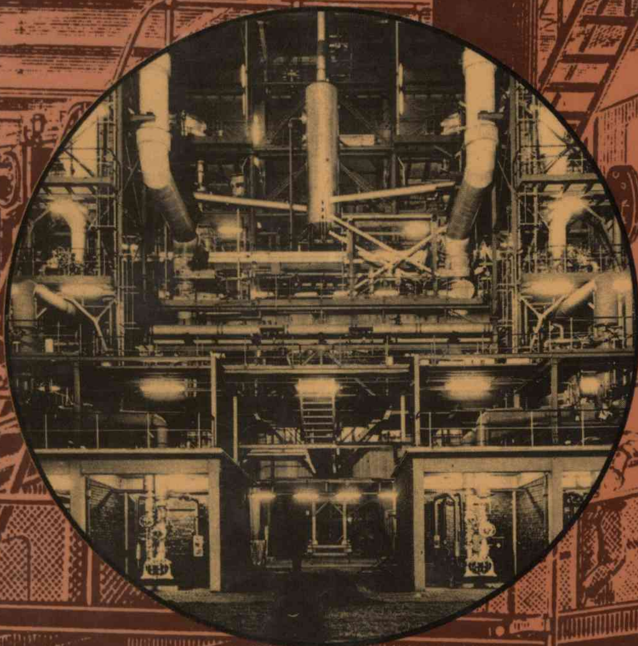


تاریخ صنعت و اختراع

جلد چهارم

تکنیکهای تمدن صنعتی

انرژی و مواد

به کوشش

موریس دوما و گروهی از کارشناسان

مقدمه از: موریس دوما

ترجمهٔ عبدالله ارگانی

تاریخ صنعت و اختراع

تاریخ صنعت و اختراع

جلد چهارم

تکنیکهای تمدن صنعتی

انرژی و مواد

به‌کوشش
موریس دوما و گروهی از کارشناسان

مقدمه از : موریس دوما
ترجمهٔ عبدالله ارگانی



مؤسسه انتشارات امیرکبیر
تهران، ۱۳۷۸

دوما، موریس، ویراستار
Dumas, Maurice
تاریخ صنعت و اختراع / اثر گروهی کارشناسان؛ ویراستار موریس دوما؛ ترجمه عبدالله ارگانی. ــ تهران : امیرکبیر، ۱۳۶۲ ـ ۱۳۷۸.
۵ ج . : مصور، عکس.
۱۴۰۰۰۰ ریال (دورهٔ ۵ جلدی).
ISBN 964-00-0107-4 (دوره ۵ جلدی).
ISBN 964-00-0427-8 (ج. ۱). ـ ISBN 964-00-0428-6 (ج. ۲). - ISBN 964-00-0429-4 (ج. ۳).
ISBN 964-00-0430-8 (ج. ۴). ـ ISBN 964-00-0431-6 (ج. ۵)
فهرستنویسی بر اساس اطلاعات فیپا.
عنوان اصلی : History generale des techniques = A history of technology & invention ...
کتابنامه.
مندرجات: ج. ۱. مبانی تمدن صنعتی. ــ ج. ۲. مراحل نخستین ماشینیسم. ــ ج. ۳. پیشرفت ماشینیسم. ــ ج. ۴. تکنیکهای تمدن صنعتی : انرژی و مواد. ــ ج. ۵. تکنیکهای تمدن صنعتی : تغییر شکل ارتباطات عامل انسانی.
ج. ۱ (چاپ دوم : ۱۳۷۸)، ج. ۲، ۳، ۴، ۵ (چاپ اول : ۱۳۷۸).
۱. تکنولوژی ــ تاریخ. ۲. صنعت ــ تاریخ. ۳. اختراعات ــ تاریخ. الف. ارگانی، عبدالله، ۱۳۰۲ ـ ، مترجم. ب. عنوان.
۶۰۹ T ۱۵ / ۲ ت ۹ د
۱۳۶۲
کتابخانه ملی ایران ۳۱۰۲ـ۶۴م



تاریخ صنعت و اختراع (جلد چهارم)

به کوشش موریس دوما و گروهی از کارشناسان

مقدمه از : موریس دوما

ترجمهٔ عبدالله ارگانی

چاپ اول : ۱۳۷۸

آماده سازی : واحد تولید امیرکبیر

چاپ و صحافی : چاپخانهٔ سپهر، تهران

تیراژ : ۱۵۰۰ نسخه

ISBN 964-00-0430-8 (vol.4) ISBN 964-00-0107-4 (5vol.set)

شابک ۸ - ۰۴۳۰ - ۰۰ - ۹۶۴ (جلدچهارم) شابک ۴ - ۰۱۰۷ - ۰۰ - ۹۶۴ (دورهٔ ۵ جلدی)

مؤسسه انتشارات امیرکبیر تهران، خیابان بهارستان پلاک ۴۸۹

فهرست

بخش سوم
صنایع بزرگ شیمیایی

پیشگفتار

مجلدهای چهارم و پنجم این اثر، وظیفه دارند چگونگی پیدایش تکنیکهایی را روشن کنند که پایه‌های اساسی شکوفایی تمدن صنعتی را در برهه‌ای از زمان تشکیل داده‌اند، که از یک سده فراتر می‌رود و بلافاصله پیش از عصر ماست. باید پذیرفت که این کار وظیفهٔ ساده‌ای نیست و در آینده با دشواریهای فراوان برخورد خواهد داشت. در آغاز شایسته است که ویژگیهای اساسی این دو مجلد را باز نماییم و تلقی خود را از آنها مشخص سازیم.

در گذشته، طی پیشگفتارهای مجلدهای پیشین گفته شد که چرا طی این گفتارها، ما بر آن بوده‌ایم که در بررسی خود، عوامل بیگانه از قلمرو صنعت را، هرچند هم که به نوبهٔ خود مهم هستند نادیده‌انگاریم، در دورانی که صنعت طی آن تا این اندازه اهمیت یافته است نمی‌بایست که خود تاریخ آن ناشناخته بماند. اما توافق بر روی محتویات آن هم، کار چندان ساده‌ای نیست زیرا این محتویات آن‌طور که بایست مشخص نشده‌اند و در واقع دستخوش انحرافاتی بوده‌اند که ناشی از پیشرفت سریع تاریخ اقتصادی و نیز تاریخ اجتماعی دهه‌های اخیر بوده است. تاریخ دیگری نوشته شده است که تلفیقهای مهمی از این دو در آن وجود دارد و بر بیشترین تعداد ممکن حوادث اقتصادی و اجتماعی شناخته و بررسی شده متکی است. این تاریخ با نادیده گرفتن حوادث مجرد سیاسی و نظامی ـ که در گذشته تنها موضوعات مورد بررسی در تاریخ را تشکیل می‌دادند ـ به شرایط زندگی توده‌های مردم روی آورده و به جنبه‌های گوناگون تمدن بیشتر پرداخته است.

تاریخ‌نویسان که خود را وقف بررسی این زمینهٔ پهناور می‌کنند طبیعتاً با تکنیک رو‌به‌رو خواهند

شد، چنین برخوردی تقریباً برای همهٔ دورانهای مورد بررسی و بویژه برای سده‌های نوزدهم و بیستم پیش خواهد آمد. این نوع رویکردها که توجه به اقتصاد، نه جامعه‌شناسی، بر آن تسلط دارد ناگزیر تاریخ تکنیک را هم «شامل» می‌شود. طبیعی است که با این رویکرد، تاریخ تکنیک، شاخه‌ای از تاریخ اقتصادی و اجتماعی خواهد بود و با چنین دیدی، این تاریخ، تنها جنبه‌هایی از واقعیت را باز می‌نماید که ضمن بررسی مطرح می‌شوند و ناگزیر باید بدانها پرداخت و از کنار مباحثی که محتوی آنها، هنوز کاملاً معلوم نشده است گذر کرد.

در سال ۱۹۳۵ آقای لوسین‌فور بخوبی متوجه اهمیت این جای خالی شد و به لزوم پر کردن آن پیش از هر اقدام دیگری برای تدوین تاریخ صنعت در یک تاریخ عمومی پی برد. وی در برابر این پرسش که: «موضوع تاریخ تکنیک چیست؟» در سه بخش به‌طور اجمالی بدان پاسخ داد: نخست، بجاست که از تکنیکها «آثار تکنسین‌ها، وجود خطاهای ناشی از شرایط کار، اشتباهات جبری، ناآشنایی کامل آنها از شرایط کلی یک تولید»، یک تاریخ صنعت تدوین کنیم. دوم، ارزیابی «سهم علم در اختراع صنعتی (و) تأثیر اختراع صنعتی در ردیفی از حقایق علمی است. با حصول این شرایط، تنها چیزی که می‌ماند این است که کوشش صنعتی را در ردیف دیگر فعالیتهای بشری جای دهیم.

تاریخ و تکنسین: آقای لوسین‌فور ادامه می‌دهد که: مجموعهٔ این سه بخش، تاریخ صنایع را تشکیل می‌دهد و معین می‌کند که برای نوشتن هریک از آنها چه شرایطی باید مهیا و چگونه مدون گردند. مثلاً، برای بخش نخست می‌افزاید: «کار تکنسین به زمان و سرزمین وی محدود نمی‌ماند.» بدین ترتیب، به انجام رساندن این بخش با موانعی برخورد می‌کند که گذشتن از آنها بسیار دشوار است. باید از خود پرسید که آیا توصیهٔ آقای فور دربارهٔ مصنوع تکنسین می‌تواند دنبال شود؟ باید پذیرفت که تأثیر این اسلوب هنوز بسیار محدود است. در دوران ما از «همه‌چیزدانان» علم و صنعت، دیگر خبری نیست، هیچ رشته‌ای بدون کارشناسی بالا وجود خارجی نخواهد داشت چنین کارشناسانی فرصتی برای مطالعهٔ تاریخ رشتهٔ تخصصی خود ندارند. چنانچه فرصتی برای شرکت در کنفرانس یا خواندن مقاله‌ای در این‌باره به‌دست آورند تنها چند اطلاع پیش‌پا افتاده و گاهی هم معلومات مورد تردید از دورانهای پیشین بدانها تلقین می‌شود؛ و غالباً کنفرانس یا مقاله‌ای با ذکر چند داستان مهیج را به‌عنوان چاشنی به‌همراه دارد که انسان از بی‌خبری عمومی تکنسینها نسبت به تاریخ صنعت متعجب می‌شود. به عقیدهٔ آنان جهان صنعت که با شرکت آنها ساخته شده است آبشخور در گذشته‌ای نسبتاً مبهم دارد و به دوران اسلاف بلافصل آنها محدود می‌شود، کسانی که

با نام آنها در جوانی آشنا شده‌اند، از آن دورتر را با تمجمج و قدری شوخی برگزار می‌کنند.

جایگیری تحول تاریخی یک رشتهٔ تخصصی در حرکت کلی تاریخ تکنیک نیز به همین ترتیب صورت می‌گیرد، صنعتگر با زحمت با رشتهٔ تخصصی خود آشنا می‌شود و از پهنهٔ دامنهٔ آن هیچ خبر ندارد. درحال حاضر، صنعتگری که برحسب ضرورت به تخصصی بالا دست یافته است زندانی زمان و سرزمین خود است.

خوشبختانه استثناهایی وجود دارد که بیشتر به استعدادهای فطری اشخاص وابسته است تا به شرایط پرورش حرفه‌ای آنها؛ محتوای این اثر گواه آشکار این امر است.

مطلبی که باقی می‌ماند ذکر این نکته است که پیشرفتهای دانش ما دربارهٔ تاریخ تکنیک از کمبود شمار پژوهشگران رنج می‌برد. چگونه ممکن است صنعتگرانی از پیشهٔ پول‌ساز خود دست بشویند درحالی که اطمینانی نیست که رشتهٔ تاریخ‌نویسی در هیچ‌کجا، حرفه‌ای پردرآمد باشد.

اما، به هرحال، بین تاریخ‌نویسان و صنعتگران باید نوعی همکاری وجود داشته باشد و تنها این همکاری است که می‌تواند نخستین گام را در راه انجام برنامهٔ آقای لوسین‌فور به پیش بردارد. می‌گویند که یک تاریخ‌نویس کاملاً آگاه چنانچه با محافل ذیربط سروکار داشته باشد مفاهیم علمی و صنعتی لازم برای تدوین تاریخ تکنیک را بسیار آسانتر از تکنسینی به‌دست می‌آورد که می‌خواهد همین اطلاعات تاریخی را برای رشته تخصصی خود گرد آورد. گرچه متأسفانه توان درک یک مورخ برای حلاجی دوره‌های کنونی صنعت، به‌علت سطح علمی بالای مبانی تکنولوژی اخیر، بسیار ضعیف است. همکاری تاریخ‌نویس و صنعتگر، امری است ناگزیر؛ و اکنون در مقیاسی محدود اما کافی برای اینکه تاریخ‌نویس سردرگم و دچار تشتت نشود، وجود دارد.

ازدحام و کمبود منابع: اگر نواقص کمی و کیفی اشخاص فرضاً برطرف شوند باز نقص دیگری می‌ماند که اهمیت آن کم نیست. مسأله به فراوانی منابع همراه با کمبود ناراحت‌کنندهٔ آنها مربوط می‌شود. هرکس می‌داند که نوشتارهای علمی و صنعتی طی دهه‌های اخیر چنان فراوان شده‌اند که هیچ شخص حرفه‌ای نمی‌تواند همه انتشارات مربوط به حرفهٔ تخصصی خود را بخواند! اما کمتر کسی می‌داند که این فراوانی پدیدهٔ تازه‌ای نیست. حتی در آغاز همین دورهٔ مورد بحث ما، تاریخ‌نویس خود را دربرابر مقادیر بسیار زیاد منابع می‌یافت و با گذشت زمان به حجم آن افزوده می‌شد. این گرچه منحصر به تاریخ صنعت نیست، در این رشته، حجمی استثنایی دارد. بنابراین، نه‌تنها نمی‌توان بر همهٔ این نوشته‌ها وقوف یافت بلکه مخصوصاً گزینش از میان این انبوه اطلاعات، که در فصلهای گوناگون، مقالات، نوشته‌ها و نیز در مدارک بایگانی شده‌ای که بدون استفاده مانده‌اند

مندرج هستند بسیار دشوار است. دور ریختن همهٔ این تودهٔ بدون استفاده درست نیست. شمار زیادی از آنها برای آشنا شدن با محیطی که صنعت معینی را به‌وجود آورده مفید است. گاهی تعدادی از تکنیکها، پس از اینکه مدتها بلااستفاده می‌مانند، در اوضاع و احوال جدیدی بسرعت به‌پیش می‌روند.

در دل این شبکهٔ متراکم، بتدریج که به زمان حاضر نزدیک می‌شویم، خطر این کمبودها بیشتر احساس می‌شود. نخست، حجم عظیم پرونده‌های مؤسسات است مؤسساتی که بایگانی آنها، هرگز طبقه‌بندی نشده‌اند، هر پژوهشگر تاریخ صنعت می‌داند که درکار ثبت اختراعات، خصلت درازگویی و لاف و گزاف، بسیار است. زمانی‌که مؤسسات صنعتی بنوعی ثبات دست یافتند ـ یعنی از نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم ـ این میل در آنها ایجاد شد که اختراعات تکمیل ناشده‌ای را به ثبت برسانند، شاید برای اینکه از رقیب احتمالی پیشی گیرند و نیز بخاطر اینکه امکانات محتمل را پوشش دهند. انشای ثبت اختراعات تمام شده با احتیاط بسیار انجام می‌گرفت تا چگونگی ماشین یا روش اختراعی به اندازه کافی مبهم بماند.

متن مقالات مجلات و نیز متون سنگینتر غالباً بوسیلهٔ نویسندگان آنها به سابقهٔ جانبداری دستخوش نوعی انحراف عمدی یا اتفاقی، از نظر حقیقت تاریخی می‌شد. مؤسسات بزرگی که کالاهایی در مقیاس صنعتی تولید می‌کردند سعی داشتند که همه‌چیز برملا نشود، و بسیاری از آنها که از نظر مالی بسیار قدرتمند شده بودند در تدوین تاریخی از صنعت، که به اشارهٔ آنها نوشته می‌شد، منافع خود را در نظر می‌گرفتند.

از سوی دیگر، بویژه از زمان جنگ جهانی دوم به‌بعد، سایهٔ اسرار نظامی بر روی بخشهای بیش از پیش گستردهٔ اطلاعات علمی و فنی، سنگینی می‌کند.

همکاری یعنی چه؟ قسمت دوم تاریخ صنعتی که آقای لوسین‌فور بدان اشاره دارد دربارهٔ مناسبات علم و فن، یعنی تاریخ علم و تاریخ صنعت سخن می‌گوید. یقین است که نویسندگان تاریخ علم در جریان سه دههٔ اخیر همکاری ارزشمندی با نویسندگان تاریخ صنعت داشته‌اند. این کار در مورد صنایعی انجام گرفته است که پیشرفت آنها بستگی کامل به محتویات علمیشان داشته است. اما باید کاملاً پذیرفت که برای دوره‌های پیش، تقریباً تا میانه سده بیستم، تاریخ علم برای تاریخ صنعت، اگر زیانی نداشته، چندان سودبخش هم نبوده است. این تاریخ، بیشتر به اعتبار دادن به رأی مشهوری نظر دارد که پیشرفت صنعت را همواره طی سده‌های متوالی به فرمان علم می‌داند ـ رأیی که برخلاف واقعیت است. در این دو مجلد باقی مانده و نیز در مجلدهای پیشین،

نمونه‌های بسیاری وجود دارد که خلاف این مفهوم رایج را ثابت می‌کنند، مانند: موتورهای حرارتی، برق صنعتی، رادیو، الکتریسیته و ....

بی‌شبهه این تفکر ریشه در تأخر بعضی از رشته‌ها صنعتی نسبت به علم مربوط به آنها دارد. تاریخ صنعت برای ارائهٔ یک تحلیل شایسته ناتوان است.

بالاخره، باید گفت که این استاد بزرگ مکتب فعلی تاریخ در فرانسه، درحال ترکیب این دو رشته، اکیداً خاطرنشان کرده است که در تألیف تاریخ صنعت «مقتضی است که تکنسینهای کنجکاو در صنعت خود و تاریخ آن با دانشمندانی که تاریخ علم رشتهٔ آنها را می‌دانند و نیز مورخانی به‌معنای دقیق کلمه ـ مورخانی با نگرش تلفیقی ـ همگی با این احساس که کار خود را ناقص و بدون نتیجه می‌دانند و خود را ناگزیر از همکاری نزدیک با یکدیگر می‌بینند به‌صورت گروهی دست به‌کار شوند». او می‌افزاید: «اما معنی همکاری چیست؟» پاسخ آن چنین است: «همکاری دربارهٔ مسألهٔ مورد بررسی و اینکه هریک از همکاران باید درحالی که رشتهٔ خود را مطالعه می‌کند موظف باشد که نتایج به‌دست آمده و نظراتی را که برپایهٔ آن نتایج حاصل می‌شوند با نتایج و اندیشه‌هایی که در همین شرایط همکاران آنها به‌دست آورده‌اند مقابله کند.»

با فرض پذیرفتن این امر که میل به همکاری در همهٔ پژوهشگران نمایان است، دو طرف باید بتوانند دستاوردهایی برابر با یکدیگر مبادله کنند. بنابراین، همان‌طور که گفتیم، در دهه‌های اخیر، تاریخ اقتصادی و اجتماعی پیشرفت چشمگیری داشته است ـ پیشرفتی با جنبه‌های گوناگون. همکاری در اطراف این رشتهٔ پژوهشی به اشکال مختلف ایجاد شده است. نوشتارهای مربوط به تاریخ اقتصادی و اجتماعی فرانسه زیر نظر استادان عالیقدری نظیر فرنان برودل[1] و ارنست لابروس[2] گواه روشن این همکاری هستند. تاریخ علم هم در همین زمان در این راستا فعال بوده ـ گرچه دستاوردهای آن در فرانسه، از حرکت کلی، کمی عقب مانده است.

بی‌شبهه این شریک سوم است که لنگ می‌زند، زیرا مجموع اطلاعاتی که ارائه می‌کند برای ایجاد یقین در شنوندگان آنها بسیار ناکافی اسهت.

ترازنامهٔ اطلاعات ما: اثر حاضر این ادعا را ندارد که به تنهایی این کمبود را جبران می‌کند. هدف آن به‌دست دادن ترازی از اطلاعات کنونی ما دربارهٔ آن فعالیت فکری بشر است که درحال حاضر از نتایج و تأثیرات آن نتایج، همگان اطلاع دارند. با ترتیب دادن فهرستی از دانسته‌ها و نادانسته‌ها می‌خواهند برای تاریخ تکنیک، در سست‌ترین بخش آن، پایه‌های بسیار مستحکمی بگذارند. پیشرفت آن را در این نیم سده تسهیل کنند. بنابراین، زمان آن رسیده است که همگی به

1. Braudel 2. Labrousse

دعوت آقای لوسین‌فور در این همکاری شرکت کنیم.

چنانچه رشته‌های دیگر فعالیت بشری محیط بر او را نادیده بگیریم، آشکارا بدین نتیجه می‌رسیم که تاریخ تکنیک را نمی‌توان تاریخ اختراعات دانست بلکه باید آن را تاریخ آفرینندگی تکنیک نامید. محقق است که این آفرینش زمانی انجام می‌گیرد که عوامل خارجی آن را برانگیزند؛ تقاضای بازار، امکان سرمایه‌گذاری و توسعهٔ صنعتی، موقعیتهای مناسب سیاسی و نظامی، دسترسی به‌یک سطح مناسب تکنیکی و غیره وجود داشته باشد. معمولاً گرایش به‌سوی قلب تکنیک برای این است تا هرچه بیشتر به چگونگی فرآیند خود آفرینش تکنیکی آشناتر شوند. در دوره‌ای که مورد بررسی مجلدهای چهارم و پنجم این مجموعه است، بتدریج که وقایع تکنیکی پیچیده می‌شوند، این دید اکتشافی بیشتر راهگشای ما خواهد بود.

نکتهٔ دیگری که باید یادآوری شود این است که به‌علت گوناگونی فراوان جنبه‌های تاریخ صنعت، تهیه طرحی که همهٔ آنها را در یک کل متجسم کند ممکن نیست. در محدودهٔ یک کتاب تنها، که در پنج مجلد خلاصه شده است ـ و در طرح اولیه قرار بود تنها در دو جلد مدون شود ـ بررسی عوامل خارج از تکنیک میسر نیست، مگر اینکه بخش بزرگی از تحلیلهای مربوطه فدا شود. چنانچه تصمیم دیگری اتخاذ شود، کاری که می‌تواند انجام گیرد چنان فشرده و محدود خواهد بود که اهمیت کار از دست خواهد رفت، و نیز ویراستار دیگری باید برگزیده شود.

سطح آفرینندگی: صنعت، با گذشت زمان پیش از پیش پیچیده شده است. با اینکه فرآیندهای تولیدی بسیار پیشرفته‌اند، منطق عمل حکم می‌کند که جای خود را به فراورده‌های سنجیده‌تری واگذارند. انگیزهٔ تلاشهایی که برای پیشرفت کارها انجام می‌گیرند این است که با ابداع تکنیکی، تولید را یا افزایش دهند یا آن را در مسیر دیگری هدایت کنند. اما روشن است که راه انداختن یک فرآیند تولیدی پیشرفته‌تر، مستلزم طرح تجهیزات جدیدی است که از تجهیزات پیشین برتر باشند و به‌طورکلی پیچیدگی بسیار بیشتری ـ اگر نه در ساختار ـ در طرز کار داشته باشند. بدیهی است که پیشرفت در هر زمینه، همیشه به ارتقا در سطح بالاتری از خلاقیت وابسته است ـ خلاقیتی که از تحول تکنیک، پدیده‌ای را همراه با تنگناها، امکانات و فرآیند خاص آن می‌آفریند.

شاید این راه میانبری از سطح آفرینندگی است که در آینده بین تاریخ تکنیک و تاریخ اقتصادی و سیاسی رابطه‌ای برقرار خواهد ساخت. این مفهوم نه‌تنها شامل کیفیت وسایل صنعتی موجود می‌شود بلکه فشار نوآور یا مهارکننده و عوامل خارجي مؤثر بر تفکر تکنسین را هم دربر می‌گیرد.

فعالیت و خودگردانی عامل اخیر، طی دورانهای مورد بررسی در مجلدهای پیشین روشن

شده‌اند. حتی می‌توان گفت که تأثیر این عامل همراه با پیشرفتهایی که پیاپی و با آهنگ سنجیده‌تر تحول انجام می‌گیرند قطعیتر خواهد شد. دربارهٔ تأثیر عامل خارجی در دوران معاصر مورد بررسی ما، تردیدهایی دیده می‌شود زیرا تأثیر رویدادهای اقتصادی و سیاسی بیشتر محسوس شده‌اند. آیا می‌توان گفت که تنها تحرک خارجی، تحول تکنیک را سبب می‌شود؟ یا اینکه آفرینندگی تکنیک انگیزهٔ فعالیت اقتصادی است زیرا باید از نوآوریهای تازه سود جست؟ این برهان دوجانبه‌ای است که شاید به‌علت نداشتن دلایل کافی به‌جایی نرسد، و شاید هم به قضیهٔ مرغ یا تخم‌مرغ، کدام‌یک اول بودند؟ شباهت بسیار دارد.

پیشگامان و پیشینه‌ها: از محتوای دو مجلد اخیر تاریخ صنعت و اختراع، دو نکته دقیقاً روشن می‌شود. نخست می‌توان گفت که مسألهٔ پیشگامان و پیشینه‌ها، چنانچه در آن تعمق شود، در مورد آفرینش تکنیک، مسألهٔ نادرستی است. اندیشه‌ای در یک مغز مبتکر خطور می‌کند، این اندیشه گاهی در یک اقدام پیشرس جامه عمل می‌پوشد. اما این اقدام، هیچ نوع نوآوری به دنبال ندارد، زیرا وضع وسایل موجود صنعتی پیدایش یک مدل مفید را اجازه نمی‌دهد و یا اینکه چون تجهیزات صنعتی موجود پاسخگوی نیازهای عهد خویش هستند شوقی برای پیشبرد صنعت وجود ندارد.

در این دو مجلد باقی‌مانده با نمونه‌های بسیار جالبی از این موارد برخورد می‌کنیم. از جملهٔ آنها اندیشه‌های نخستین دربارهٔ موتورهای درونسوز فیلیپ لوبون یا طرحهای برادران نیپس (کلود ونیسفور) در مورد کارهای چارلز ببیج برای ساختن یک ماشین آنالیتیکی الکترومکانیکی است. داستان موتور با هوای گرم نیز بسیار جالب‌توجه است. این موتور، گرچه در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم بوسیلهٔ استرلینگ[1] طرحریزی شد، تنها در نیمهٔ دوم سدهٔ ما به‌کار گرفته شد. درست است که در این فاصلهٔ زمانی، موتورهای حرارتی و بعد برقی به‌طور گسترده‌ای رواج یافتند. موتور با هوای گرم، تا زمانی‌که زیر دریایی و سفینه‌های فضایی ساخته نشده بودند به‌صورت صنعت ناآشنایی بدون استفاده مانده بود؛ و نیز گویا لازم بود که مسألهٔ وسایل مبادله‌گر ما راه‌حل تازه‌ای بیابد.

صنایع ناآشنای چشم به‌راه زمانهای دور، در این دوره کم نبودند. مولدهای برق مدت نیم سده در انتظار ماندند تا اینکه آهنرباهای دائمی جای خود را به مغناطیسهای برقی واگذاردند که از زمان پیدایش الکترومغناطیس شناخته شده بودند. صنعت ناآشنای دیگری که توربین بخار است همین مدت را در انتظار ماند، زیرا جهان صنعت و اقتصاد هیچ لزومی به تقویت موتورهایی که با سرعت زیاد بگردند نمی‌دید؛ و نیز مسألهٔ کاربرد موتورها نمی‌توانست حل شود. یکی دیگر از صنایع متروکه، (تلگراف بی‌سیم) با آشکارسازی بلورین است که مدت چند سال به‌طور تفننی به‌کار می‌رفت،

1. Sterling

سپس به‌مدت یک ربع قرن کنار گذاشته شد تا آنکه نیمرساناها به صنعت الکترونیک راه یافتند.

پیشینه‌ها در مواردی اهمیت تاریخی بسیار داشته‌اند، که از آن میان می‌توان از اختراع نیکولاوس آوگوست اوتو با موتور چهار زمانی او نام برد که در فرانسه به توسط نشریهٔ مشهور Beau de Rochas پانزده سال پیش از آن، برای همیشه متروکه اعلام شده بود. کمی بعد موتورهای ساخت کلمان آده که تنها به کمک باد از زمین برمی‌خاستند، دعوی برادران رایت را که می‌خواستند امتیاز همهٔ وسایل مربوط به پرواز در فرانسه به آنها داده شود به شکست کشانید. در زمان بسیار اخیرتری در زمینه دیگری تراست آلمانی: IG Farben Industrie روش هیدروژندهی کاتالیزگری اسیدهای چرب را به‌علت لغو اختراع ثبت شده‌ای که شامل این روش شیمیایی بود توسعه داد. علت لغو آن اختراع این بود که آقایان بوو و بلان، شیمیدانان فرانسوی، قبلاً آن را به‌طور آزمایشگاهی تهیه کرده و کار خود را نیز انتشار داده بودند.

آفرینش تکنیک و تصادفات: نوآوریهای بزرگ تنها در یک محیط صنعتی مناسب می‌توانند رشدونما کنند؛ اما در چنین محیطی هم تفکر تکنسین سهم مهمی دارد و حتی گاهی عامل اصلی یک جهش است. روشن است که نیروی آفرینندگی وی کمتر تحت تأثیر حوادث اقتصادی قرار می‌گیرد. جالب‌توجه است که یک رشته نوآوریها که در چنین جامعهٔ صنعتی تأثیر عمیقی داشته‌اند در دورانی از کسادی طولانی و بحرانهای ادواری مهم طی سه دههٔ اخیر قرن حاضر پدید آمده‌اند: موتورهای بنزینی، موتورهای دیزلی، برق صنعتی، انتقال برق چند فاز، توربینهای بخار، استخراج آلومینیوم به روش الکترولیزی، ساخت فولادهای مخصوص و کاربرد ابزارهای تندبُر در دستگاههای تراش رولوری، رنگهای سنتزی و . . . . در همین دوران بود که نخستین صنایع اتومبیل‌سازی پدید آمدند و گامهای اولیه در ارتباطات رادیوالکتریسیته و پرواز دستگاههای سنگینتر از هوا، برداشته شد. وانگهی در مرحلهٔ دیگری از صنعتی شدن جهان به سالهای ۳۰ همین سده برخورد می‌کنیم که از نظر کسادی شدید دنیای سرمایه‌داری شهرت بسیار دارد. جهش تحقیقات صنعتی سالهای ۲۰ به‌اندازهٔ لازم بررسی نشده است. این جهش با طرح و به کاراندازی کراکینگ (مولکول‌شکنی) نفت، سنتزهای بزرگ صنعتی بسپار (پلیمر)های وینیلی و آکریلی، نزدیک شدن به رادار، نخستین انتقالهای پیام بوسیلهٔ تلویزیون، برقراری روابط فضایی بین قاره‌ها، برداشتن گامهایی نخستین در ساختن ماشینهای حساب، که کمی بعد الکترونیکی شدند، ممتاز شده است.

محقق است که از این تصادفها نمی‌توان نتایج قطعی گرفت اما می‌توان بدانها ارج گذاشت و مورد بررسی و تحلیل قرار داد، و نیز شاید شایسته آن باشد تا از آنها تابلویی کاملتر از آنچه که در

اینجا آمده است داشته باشیم.

شکستهای تعادل: چون آفرینش تکنیک تا حدودی مستقل از تظاهر آن است، جا دارد از خود بپرسیم که عوامل درونی حاکم بر جریان تحولی آن کدامند؟ در این کتاب بر آن نیستیم که دربارهٔ این جنبه از تاریخ صنعت تحلیلی نظری داشته باشیم زیرا این کار از محدودهٔ اطلاعات کنونی ما بیرون است. با وجود این، خواننده در بخشهای مختلف عناصری از این تحلیل را خواهد یافت. درگذشته با اوضاع و احوالی برخورد شده است که مجموعهٔ وسایل صنعتی موجود در آنها چنان تعادلی داشته‌اند که هیچ‌گونه تحولی مشاهده نمی‌شد. در واقع، چنین ثباتی برای یک صنعت پیچیده، در کلیت جامع آن هرگز وجود نداشته است. اما این نیز هست که بارها در تکنیک معینی که مثلاً یک نوع صنعت را شامل می‌شود، این ثبات مشاهده شده است. در چنین حالتی نه‌تنها وسایل صنعتی دارای تعادل هستند، بلکه علاوه بر آن، هیچ عامل خارجی با خصلت تکنیکی، اقتصادی، اجتماعی یا سیاسی در برهم زدن این ثبات دخالتی نمی‌کنند. به‌عبارت دیگر، این تحول چنان آرام انجام می‌گیرد که ثابت می‌نماید. چنین ثباتی برای تعدادی از صنایع بزرگ سنتی که تا حدود نیمهٔ سدهٔ هجدهم به اقتصاد خدمت می‌کردند، مشاهده شده است.

اما با تغییر شرایط، یک عامل خارجی موجب یک نوآوری برجسته‌ای می‌شود که تعادل این محیط تکنیکی را برهم می‌زند. در مجلد سوم این اثر، با یکی از این جوادث، که در سدهٔ هجدهم بسیار طبیعی و ساده می‌نمود برخورد کردیم. صنعت نساجی که در انگلستان تحت تأثیر ورود روزافزون غوزه قرارگرفته بود به نیازهای مصرف محلی و سپس صادرات پاسخ می‌گفت. تقاضا برای نخ بافندگی که با کاربرد ماسورهٔ پرنده افزایش می‌یافت فکر خلاقهٔ کسانی را برای اختراع مکانیسمی که سرعت تولید را افزایش دهد برانگیخت. تعادل تکنیکی اولیهٔ میان صنایع بافندگی و ریسندگی درهم ریخت و روی تکنیکهای بافندگی فشار آمد تا شکاف موجود بین این دو رشتهٔ اساسی این صنعت را پرکند. در همان زمان، فشار بر وسایل تولید مربوط به مرحلهٔ پس از ریسندگی، از جین یا حلاجی پنبه تا کاردینگ (شانه‌کشی) و فتیله‌سازی زیاد شد. تنشهای درونی صنعت نساجی زمانی روبه‌کاهش نهاد که در آغاز نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم تعادل تازه‌ای برقرار شده بود.

کارساختن و راه‌اندازی مکانیسمهای تازه، انگیزهٔ پیدایش فشارهایی از نوع دیگر شد که این بار در زمینه‌های صنعتی دیگری اثرگذاردند. این فشارها هم در رشتهٔ تکنیکهای ماشین‌سازی و تکنیکهای آلیاژهای آهنی و هم در تولید انرژی بود که مقصد و منظور آنها بودند. زمانی‌که تولید صنعتی رنگها آغاز شد دامنهٔ این فشارها به قسمت صنایع شیمیایی نیز راه یافت، تا آنجاکه روش شیمیایی سفید

کردن پارچه‌ها پایه‌گذاری شد که بسیار سریعتر از روش سنتی در آفتاب گذاردن آنها عمل می‌کرد.

در آهنکاری، به‌عنوان نمونه، می‌توان از کوره‌های بلند کک‌سوز نام برد که تولید چدن را افزایش داد. این نوآوری در داخل این حوضهٔ تکنیکی، انگیزهٔ پیدایش فشار روی روشهای تصفیهٔ چدن بود. این شکاف عریض با پیدایش روش پودلاژ (تهیهٔ آهن ورزیده) پر شد. با این حال، چند دهه پس از آن در زمینهٔ تهیهٔ فولاد تنگنای دیگری پدید آمد. این تنگنا که در آغاز سده زیاد نبود بتدریج و هنگامی بیشتر محسوس می‌شد که ساخت ماشین‌ابزار گسترش می‌یافت. لوکوموتیوها و ریلها ساخته می‌شد؛ ساختمانهای اسکلت فلزی، پلها و کشتیها برپا می‌شدند؛ و نیز لزوم زره‌پوش کردن ماشینهای جنگی در دهه‌های پایانی سدهٔ نوزدهم، و تولید گلوله‌های توپ و خمپاره‌ها افزایش می‌یافت. در بخش نخست مجلد پنجم دیده خواهد شد که چگونه تکنیکی که مانع را دور زد مسألهٔ کمبود فولاد را حل کرد. و این نخستین نمونه از فرآیند دینامیسم تحول یکسان است که با تظاهرات متعدد آن برخورد خواهیم کرد. از آن میان روشهای تثبیت نیتروژن هوا، در آغاز سدهٔ بیستم و گذر از تکنیکهای الکترومغناطیسی به تکنیکهای الکترونیکی برای ساختن و تکمیل ماشینهای حساب، در تاریخ تکنیکهای معاصر، مراحل بسیار مهمی به‌شمار می‌روند.

تسلسل نژادی: آفرینش تکنیک معمولاً با تطبیق‌دادن نمونه‌ای که کاربرد کاملاً معینی دارد، با شرایط کاربرد تازه انجام می‌گیرد. می‌توان از جابه‌جاکردن مورفولوژی یک اختراع سخن گفت که انواع آن مبنای نسل کم‌وبیش طویلی از اختراعات خواهند شد. همچنین می‌توان از انتقال دادن وظایف اصلی یک سیستم به چارچوب مورفولوژیکی دیگری سخن گفت که هنوز باآن سازگار نشده‌اند.

در مورد نخستین نسل، نمونه‌ای را می‌توان درنظر گرفت؛ مثل اختراع ژان ـ لویی مونوری. مسأله مربوط به موتورهایی است که اساساً از یک القاگیر (روتور) و یک القاگر(استاتور) تشکیل شده‌اند. کهنترین شکل آنها چرخاب با محور عمودی است که می‌توان آن را در آثار ویتروویوس یافت و نمونه‌هایی از آن، سدهای مقابل آبهای زیاد با ارتفاع ریزش کم از همان زمانهای قدیم وجود داشتند. این نوع مورفولوژی را انواع گوناگون توربینهای آبی، از توربین ساخت فورنیرون تا توربین کاپلان رعایت کرده‌اند. نیازی به گفتن نیست که همهٔ این توربینها در این نژاد قرار دارند. دیده خواهد شد که توربین پلتون از نظر مورفولوژی، جدای از این نژاد و به توربین بخاری لاوال نزدیکتر است. اما نژاد مورد نظر ما با توربینهای آبی پایان نمی‌گیرد، بلکه با تغییر مهمی در ساختار، بدون اینکه اتحاد روتور ـ استاتور به‌هم بخورد سرسلسلهٔ انواعی از توربو ماشینها می‌شود که توربینها بخاری نوع پارسنز (چارلز الجرنان) و توربینهای متعدد دیگر سپس توربین گازی و توربوراکتور از

آن جمله‌اند. تلمبه‌های آب، تلمبه‌های باد، و دمهای گردنده را می‌توان از همین نژاد دانست. در پایان در ساده‌ترین نوع این موتور، لااقل در خطوط کلی روتور حذف شده است و در استاتورآکتورها و پولسورآکتورها تنها استاتور باقی مانده است. خواهیم دید که این سلسله موتورها با بهره‌گیری از رشتهٔ دیگری از تحول، که از نوع کارکردی است، ادامه می‌یابد.

پیش از این، رواج یک نژاد مورفولوژیکی باید بررسی می‌شد و آن موتورهای پیستونی با حرکت رفت و برگشتی بود. این نژاد اساساً با تلمبه‌های آب آغاز می‌شود و با تلمبه‌های باد و دستگاه بادی فیزیکدانهای اواخر سدهٔ هفدهم و سدهٔ هجدهم ادامه می‌یابد. ماشین بخار نیوکامن مدت نسبتاً کوتاهی جای دستگاههای بالا را که مدتها ـ حدود دو سده ـ درکار بودند اشغال کرد تا اینکه شکل موتور اولیهٔ و درونسوز، موتورگازی معمولی، موتور بنزینی و موتور دیزلی، به اعتبار خصوصیات مورفولوژیکی اساسی خود تکثیر یافتند.

این سلسله، تنها با پیوند با جریانهای پیاپی و گوناگون توانست ادامه یابد. آب در آنها نقش محرک را نداشت و این وظیفه را انبساط بخار و دتانت آن عهده‌دار بود که جای خود را به گازهایی که در سیلندر می‌سوختند داد. این تسلسل نژادی کارکردی با تسلسل مورفولوژیکی در موتورهای گردان برخورد کرد و ثمرهٔ این برخورد در آن زمان نخست توربین بخاری و سپس توربین گازی بود. بدون شبهه علت پشت‌سرگذاری مراحل اخیر، نخست این بود که توانستند بخار متراکم را تولید و از آن استفاده کنند و سپس در سیلندری، مخلوط هوا و سوخت را مشتعل سازند و از آثار آن بهره گیرند.

این مشاهدات متضمن این امر نیست که توالی زمانی دقیقی در این نوآوریها وجود داشته است، بلکه می‌توان گفت که دوره‌های تکامل آنها تقریباً در مجموع توالی داشته‌اند. اما زمانی‌که به پایان این تسلسل می‌رسیم. بنوعی واگرایی این پدیده مواجه می‌شویم و می‌بینیم که پیدایش توربورآکتور و استاتورآکتور و پولسورآکتور با یکدیگر همزمان می‌باشند.

در اینجا نمونه‌های دیگری از این تسلسل خانوادگی در تحول رشته‌های گوناگون تکنیک را ذکر نمی‌کنیم. از این نمونه‌ها تقریباً در همه زمینه‌ها دیده می‌شوند و ما نمی‌خواهیم اهمیت آنها را گوشزد کنیم. نتیجه‌ای که بی‌درنگ از این مقدمه به‌دست می‌آید این است که نوآوری در زمان خود آشکار می‌شود و لااقل زمانی‌که دستاورد تکنیکی، ساخت نمونه‌ای مؤثر را که پاسخگوی نیازهای مخفی یا آشکار سیستم اقتصادی حاکم باشد ممکن سازد.

تکنیکهای سیرشده تکنیکهای سیرناشده: مطلب را نوع دیگری نیز می‌توان بررسی کرد. سلسله‌هایی در نسلهایی از صنایع پدید می‌آیند که زندگی تکنیکی کم‌وبیش محدودی دارند. از میان آنهایی که

دیده‌ایم برخی کمال‌یابی خود را از دست می‌دهند و از نظر تکنیکی سیرشده هستند. آنها وظیفهٔ خود را به‌طور کامل انجام می‌دهند، اما با وسایل در دسترس و گزارشهای تحولی، معلوم نیست چگونه ممکن است تغییر شکلهای اساسی و مفید در آنها ایجاد کرد. همهٔ موتورهای پیستونی با حرکت رفت‌وبرگشتی از نظر مکانیکی سیرشده هستند اما تعدادی از آنها بی‌مصرف شده‌اند. آنها دیگر به‌کار گرفته نمی‌شوند و در فرصتهای کوتاه یا متوسط زمانی، ظاهراً بختی ندارند که مورد استفاده قرارگیرند. ماشین بخار پیستونی بهترین نمونه است که نه‌تنها سیر بلکه برای همیشه بی‌مصرف شده است؛ درحالی‌که بقیهٔ انواع موتورهای پیستونی، تلمبه‌ها و موتورهای درونسوز، گرچه سیر شده‌اند اما فعال می‌باشند.

همین امر برای تعدادی از دستگاههای گردان نیز صدق می‌کند. مثلاً تلمبه‌های آب و هوا، (دمها)، توربینهای بخاری نشان می‌دهند که تکنیکی سیرشده دارند، درحالی که هیچ‌یک از این دستگاهها را نمی‌توان بی‌مصرف به‌شمار آورد. در مقابل، بسیار محتمل است که توربین گازی که نتیجهٔ برخورد یک تسلسل مورفولوژیکی با یک تسلسل کارکردی است، همان‌طورکه درگذشته دیدیم تکنیک سیرناشده‌ای دارد. در این دو مجلد باقی‌مانده نمونه‌های دیگری از تکنیکهای سیرناشده خواهیم دید که دستگاههای الکترونیکی، شیمی مواد سازنده، تهیه و سنتز مواد زیستی از نمونه‌های جالب آن هستند. در زمینه‌های بسیار گوناگون، برای توصیف بیشتر این امر، ساخت وسایل بالابری و تعمیرات، ساخت سفینه‌های فضایی را به‌یاد می‌آوریم. اما در این موارد تکنیکهای پیچیده‌ای به‌کار رفته‌اند که در این مختصر نمی‌توان به تجزیه و تحلیل آنها پرداخت.

خلاقیت با واکنشهای زنجیری: برای اینکه به راه‌های بزرگ تحول بازگردیم و آخرین نمونهٔ ساده شده را از آن به‌دست آوریم می‌بایست پدیدهٔ فشارهای متقابل بین گروه‌های تکنیکی مشخص را بررسی کنیم. این فشارها انگیزهٔ واکنشهای زنجیری هستند که در اغلب موارد راست خطی نیستند و بتدریج که به دوران کنونی نزدیکتر می‌شویم شبکهٔ آن پیچیده‌تر می‌شود. این واکنش را نمی‌توان همچون روش تسلسل نژادی که از آن سخن راندیم به کمک یک مورد تکنیکی یا سیستمی از کارکردهای روز توضیح داد. یک حادثهٔ تکنیکی منبع صدور انگیزه‌هایی است که به‌طور فزاینده‌ای به‌سوی آماجهای گوناگون انتشار می‌یابند تا فرآیندی از نوآوری‌ها را درگروه‌های تکنیکی پدید آورند که با آنها روابط متقابل تأثیرگذاری دارند. این انگیزه می‌تواند یک حادثه اقتصادی هم باشد، مثل واردات پنبه به انگلستان و نیترات به فرانسه، یا نیاز روزافزون به ارتباطات و بارکشی سریع در سده‌های نوزدهم و بیستم، یا یک حادثه اجتماعی ـ همان‌طورکه در مثال پیش دیدیم ـ یا از اواخر

سدهٔ نوزدهم، مهاجرتهای متناوب و روزانهٔ کارگران به مجتمعهای بزرگ شهری.

ما این پدیدهٔ واکنش زنجیری را تنها برپایهٔ انگیزهٔ تکنیکی آن بررسی می‌کنیم. به‌عنوان نمونه، یک حادثه مهم، مثلاً اختراع دینام برگشت‌پذیر بوسیلهٔ گرام را درنظر بگیرید. ما برای ساده کردن مطلب، واکنشهایی را، که می‌توان آنها را جانبی نامید ندیده می‌گیریم. این واکنشها با تکنیک تازه در یک سطح قرار می‌گیرند و تأثیراتی در تکنیکها اعمال می‌کنند که اساساً، بستگی به ساخت آن، مکانیک ابزار دقیق، تولید مسی با خلوص شیمیایی درخور سیمهای برق و غیره دارد. مورد آخر، بیشتر تابع تکامل مولدهای برق است.

این یک موردی است که در یک محیط تکنیکی معین متحول سر بر زده است. این مورد تحول مربوط به خود را خواهد یافت که نخستین مرحلهٔ آن، تولید جریان متناوب است. برای اینکه این جریان به‌یک فراوردهٔ اقتصادی تبدیل شود می‌بایست وسیلهٔ انتقال آن را یافت و این امر بدون آفرینش تجهیزات مربوطه، کابلهای حامل، مقره‌ها، ترانسفورماتورها، دیژونکتورها و غیره عملی نیست. یکی از نخستین کاربردهای این جریان، پس از اینکه راه انتقال آن را یافتند تغذیهٔ موتورها در کارگاهها یا موتورهای کَشنده است. برای استفادهٔ بهتر از این نیروی محرکه، تکنیک ساخت موتورهای الکتریکی و تطبیق آنها با اشکال گوناگون جریان، هم برای موتورهای کارگاهها و هم برای موتورهای لوکوموتیو و تراموای آن را تکامل بخشیدند، که در مورد اخیر، در شبکهٔ راه‌های آهن؛ انگیزهٔ نوآوریهایی شد.

جریان برق که بدین ترتیب در دسترس قرارگرفت و لااقل به فواصل متوسطی انتقال می‌یافت دو کاربرد دیگری را همزمان با کاربرد ماشینهای استفاده کننده از نیروی محرکه، سبب شد. کارهای آزمایشگاهی سدهٔ نوزدهم، اثر ژول و الکترولیز را پدید آوردند. کوششها و موفقیتها در زمینه‌های این دو کاربرد، پیش از ساختن دینام بود (آبکاری برقی) و لامپهای قوسی حدود ده سال عمر داشتند. این وسایل، هنوز نارس و پرهزینه بودند. برق صنعتی پس از مدت کمی انگیزهٔ روشنایی با لامپهای روشنایی و تهیهٔ فلزات خالص از راه الکترولیز شد، که نخستین کاربرد آن، تهیهٔ مس بود؛ سپس بنا بر اهمیتی که در آن روزگار داشت، برای تهیه آلومینیوم مورد استفاده قرارگرفت استخراج فلزات قلیایی از راه الکترولیز کمی پس از آن عملی شد و برای صنایع شیمیایی تعدادی واکنشگر شیمیایی جدید و قوی را فراهم ساخت که در آن زمان بسیار باصرفه بود.

بدین ترتیب، پس از اختراع مولدهای برق و اختراع آقای گرام یک رشته واکنشهای زنجیری تحقق، و روزبه‌روز گسترش یافتند. وضع در بخش صنایع مادر هم بدین‌گونه بود. همین‌که دست

به‌کار ساختن آلترناتورهای بزرگ شدند، ماشین بخار کلاسیک پیستونی را ضعیف دیدند. پس از کوششی که برای تقویت آن انجام گرفت به‌طرف ماشینهای دیگر، نخست توربینهای بخار، سپس موتورهای دیزلی روی آوردند. لزوم تطبیق منابع انرژی با کار ماشینهایی که با سرعت زیاد می‌گردند تأثیر بسیار در تکمیل این ماشینها داشت. موتور دیگری ساخته شد و آن توربین آبی بود. دامنهٔ کاربرد آن بزودی از دامنهٔ کار موتورهای موجود فراتر رفت و تنوع مدلها آن‌چنان بود که در آبشارهای بسیار گوناگون، می‌توانست به‌کار گرفته شود. این وضع، تکثیر منابع آبی را سبب شده نوآوریهای تازه در ساخت سدها در همه‌جاها پیاپی رخ نمودند و لزوم تجهیز آنها با وسایل جدید، شکوفایی بزرگی .در کارگاهها پدید آورد.

تأثیر واکنشهای زنجیری بعدی به‌اندازهٔ واکنشهای قبلی برای هر مورد تکنیکی، تعیین‌کننده است، و این نوع انتشار آفرینش تکنیکی منحصر به نمونهٔ نسبتاً ساده‌ای که در اینجا بدان پرداختیم، نیست. بلکه برعکس، فرآیندی دارای خصلت عمومی است که بتدریج که در یک محیط تکنیکی بیش از پیش فشرده‌تر نفوذ می‌یابد پیچیده‌تر می‌شود. دیده می‌شود که این زنجیره‌ها انشعاباتی می‌یابند و این انشعابات کمک می‌کنند تا اثرات متقابل تحول گروه‌های تکنیکی گوناگون، تجزیه و تحلیل فرآیند پیشرفت فنی مجموعه را ممکن سازند. این پدیده که معاصران ما را تا این حد ناآرام ساخته است از نوعی منطق درونی مایه می‌گیرد که به تازگی حوادث سیاسی، نظامی، اقتصادی یا اجتماعی را آشفته کرده است. تنها آشفتگی تحمیل شده بدان، سرعت دادن آهنگ نوآوریها در بعضی موقعیتهای بحرانی است. زمانی‌که مراحل تحول به تحریک یک حادثهٔ بیرون از حوضهٔ تکنیکی شروع می‌شوند عاملی که آهنگ پیشرفت را در همان ضرباهنگ پیشرفت موقعیت پیشین مهار کند وجود نخواهد داشت. «جهش به پیش»، عوامل تکنیکی تازه‌ای از تحول ایجاد خواهد کرد که فشار آنها بر فشارهای موجود افزوده خواهد شد تا مرحله جدید سرعت گرفتن کل زمینهٔ تکنیک را به‌طور فزاینده‌ای افزایش دهند. این همان حالتی است که در پیامدهای دو جنگ سدهٔ بیستم دیده شد. هریک از ان جنگها به‌عنوان «نوعی از تمدن» این سده را تحت تأثیر قرار داد، بازارهای تازه‌ای گشوده شدند و تقاضای کالاهای پیشرفته با فوریت بسیار زیاد جهت مقاصد صرفاً جنگی همیشگی شد. به دنبال جنگ جهانی نخست، رشته‌های بسیار مطلوب عبارت بودند از: ساخت اتومبیل و هواپیما؛ تولید لامپهای ترمویونیک؛ تولید نخستین گروه فراورده‌های شیمیایی. پس از جنگ دوم، مسألهٔ از توربوراکتورها به بسپارهای وینیلی و آکریلی و آنتی‌بیوتیکها کشید، بدون اینکه از زمینه‌های دیگری سخن گوییم که پیشرفت تکنیک در مورد آنها اگرچه درخشش رشته‌های

پیشین را نداشت در تحمیل آهنگ تازه تولید از جهت کمیت و تنوع، به همان اندازه مهم بود.

انقلاب پیاپی: به‌طور قطع با موشکافی در تحلیل دینامیک ویژهٔ تحول تکنیکهاست که ما می‌توانیم موقع فوق‌العاده‌ای را که بشریت به چنگ آورده است درک کنیم. گاهی با اصطلاحات کنایی این موقع را تشریح می‌کنند که در داوری بوی سستی از آن استشمام می‌شود و به اضطرابی مبهم و کاملاً کسل‌کننده می‌انجامد. با پیش کشیدن فکر انقلابات پیاپی می‌خواهند دشواری کار را منحرف سازند، اما با این کار نمی‌توان علل و محتوی را بیان کرد. در این جا دربارهٔ مفهوم انقلاب صنعتی و روابط آن با تاریخ صنعت، که در پیشگفتار مجلد سوم این اثر بررسی شدند، زیاد مکث نمی‌کنیم. شایسته نیست که زبان تاریخی اصطلاح انقلاب صنعتی را محو کنیم ـ اصطلاحی که درپی شرح و بیان آثار توأم عوامل بسیار گوناگون و نیز گذار یک تمدن سنتی به تمدنی دقیقاً صنعتی است. فراوانی نوشتارهای مربوطه، گویا مسأله را روشن نساخته است. زمانی‌که کلود فولن این پرسش را پیش می‌کشد که «انقلاب صنعتی چیست؟» و نمی‌تواند تردید خود را نسبت بدان پنهان کند و در پایان، خود بدان چنین پاسخ می‌دهد: اطلاعات ما دربارهٔ انقلاب صنعتی از ۲۵ سال پیش تا کنون بسیار زیادتر شده است (۱۹۷۱)، اما این افزایش اطلاعات در زمینهٔ پیچیده بودن مسأله است نه در توافق روی توضیح کلی آن.» دیگر مورخان تاریخ تمدن کمتر آشتی‌پذیر می‌نمایند. آقای رنه‌شرب که دربارهٔ تاریخ تمدن سدهٔ نوزدهم کتابی دارد، و چنین اظهار عقیده می‌کند که «این به‌اصطلاح انقلاب صنعتی نه پیشتر از سال ۱۷۸۹ بوده است و نه دیرتر از سال ۱۸۱۵. طرفداران این اصطلاح، بر روی پیشرفتهای روزافزون در تکنیکهای تولید و حمل و نقل انگشت می‌گذارند؛ اما اینها اختراعاتی از سدهٔ هجدهم هستند که در آن زمان به‌ثمر نشستند.»

به‌عبارتی دیگر، اگر بپذیریم که انقلاب صنعتی در نیمهٔ دوم سدهٔ هجدهم در انگلستان آغاز شد و آفرینندگی تکنیک بتدریج سرعت گرفت، می‌توان گفت که این انقلاب، پیوسته به راه خود ادامه می‌دهد و تنها پس ازگذشت یک یا دو سده ممکن است به پایان خود نزدیک شود؛ مدت زمانی‌که در مقایسه با تاریخ چهار هزارسالهٔ تمدن شناخته شدهٔ ما، بسیار کوتاه است. بجاست بگوییم که در برپایی آن، نه فقط چند ملت برتر، که همهٔ جوامع بشری شرکت داشته‌اند.

برای اینکه ما در رشتهٔ مورد بررسی خود، یعنی تاریخ تحلیلی تکنیکها، این موضوع را مورد بررسی قرار دهیم باید گفت که مفهوم انقلاب صنعتی، چه در صیغه جمع و چه در مفرد آن، تنها یک مفهوم بدون تفسیر است و دربارهٔ وجود آن باید به داوری نشست. در اینجا سخن ما ناظر به «نخستین» انقلاب نیست که این همه دربارهٔ آن مرکب صرف کرده‌اند و نه به «دومین» انقلاب که

چنان مبهم است که می‌توان آن را تنها لقلقهٔ زبان دانست. دربارهٔ آنچه که گاه‌گاهی به‌عنوان «سومین انقلاب» اصطلاح می‌شود لازم به اظهار نظری نیست. در اینجا تردیدها تشدید می‌شود زیرا دیگر مسألهٔ تغییر شکل یک معضل اجتماعی ـ اقتصادی وابسته به یک جهش صنعتی درمیان نیست.

توهم انقلاب سوم صنعتی: در اتحاد شوروی [سابق] تعلیم داده می‌شد که دومین جنگ جهانی منجر به یک «انقلاب علمی و تکنیکی» شده است ـ انقلابی که زودرس است، بنابراین عمر بلندی نخواهد داشت. بدرستی روشن نیست که این فکر از کجا آمده است. تاریخ‌نویسان شوروی ما را، غالباً به ملاکهای زمانی ویژهٔ خود، به‌حق عادت داده‌اند. اما در مورد تاریخ صنعت، مقطع انقلاب اکتبر، که در زمینه‌های دیگری اثر گذاشته است، توضیحات تکمیل‌کننده‌ای با خود ندارد. این توضیحات حتی در زمینه‌ای که بکلی با آن انقلاب بیگانه است، با وسواس و ملاحظه‌کاری فراوان بیان می‌شود، تو گویی اورادی تکرار می‌شوند که فراموش کردن آنها کفر است. محققاً ما دیگر در زمانی نیستیم که مارکس یا لنین را همچون پدران معنوی یک پروتون استالینی می‌دانستند که به بهانه اینکه دانش پرولتاریایی نمی‌تواند طرفدار احتمالات باشد و رشتهٔ ژنتیک مورگان را تفکر «مارکسیستی» رد می‌کند ـ زیرا دقیقاً مقابل آن است ـ با یک پروتون بورژوایی، جنگ سرد آشتی‌ناپذیری را به‌پیش می‌برد؛ با این حال، کاملاً به ناگزیر اعلام می‌کنیم که مصالحه‌جویی هنوز دستاویزی برای بعضی تأویلهای تاریخی است و ورود اصطلاح انقلاب علمی و صنعتی در آغاز سالهای پنجاه این سده، آشکارا میوهٔ آن است.

این مفهوم اندیشه‌هایی را که تحت تأثیر مکتب شوروی نیستند، گمراه ساخته است. اما اکنون تا اندازه‌ای انعطاف یافته و انقلاب سوم صنعتی، به‌طور ساده به‌یک انقلاب تکنیکی تبدیل شده است. آیا یادآوری تفاوت معنی این دو مفهوم لازم است؟ چنین نمی‌نماید که آن گروه از نویسندگان فرانسه که اخیراً این نظریه را بسط داده‌اند، نظیر وانیل فوریا و پیرسر به تحول تکنیکها در سالهای اولیهٔ سدهٔ بیستم و اساساً در دورهٔ میان دو جنگ جهانی، که می‌توان آن را یک دورهٔ کلیدی دانست، ارزش واقعی داده باشند. چنانچه فرصتی برای تعمق کافی دربارهٔ گسترش حوادث تکنیکی پیش از دومین جنگ جهانی داشته باشند خواهند دید که همهٔ نوآوریهایی که از آنها برای تأیید ادعای خویش بهره می‌گیرند میوهٔ دانشی است که در این دوره به‌دست آمده است. این جنگ، شرایطی را ایجاد کرد که مانند جنگ پیش از آن، پژوهشهای تکنیکی سرعت گیرند.

این نویسندگان اظهار می‌کنند: «سومین انقلاب صنعتی، با انرژی هسته‌ای مشخص می‌شود؛ صنایع الکترونیکی و شیمیایی، نوک پیکان آن است، و نیز تکمیل ماشینهای ابزار («اتوماتیسم»)،

تکثیر ماشینهای جدید در هر رشتهٔ تولیدی، میناتوری کردن، کامپیوترها، تلویزیون و تسخیر فضا در آن جای دارند . . . مبادلات بی‌وقفه علوم و تکنیکها در آن سامان یافته‌اند . . .» کوشش برای اثبات اینکه همه این دستاوردها با یکدیگر برابر می‌باشند بر عهدهٔ خواننده است. می‌توانستند برای سالهای ۲۰ این سده و حتی دههٔ هشتم سدهٔ نوزدهم شرح مشابهی تنظیم کنند.

اثبات سادهٔ تحقق یک انقلاب صنعتی (یا تکنیکی، هرکدام را بپسندید) در سدهٔ ما به خودی خود یک فرضیهٔ پژوهشی نیست زیرا بر هیچ نوع تحلیل فرآیند تحول تکنیکها، نه‌تنها در این دوره بلکه همچنین در دوره‌های پیش از آن هم استوار نمی‌باشد. روی‌هم‌رفته می‌توان گفت که ما به این انقلاب بسیار نزدیک شده‌ایم، زیرا یک مورخ می‌تواند عناصر شایسته‌ای برای قبول آن در اختیار داشته باشد.

انرژی هسته‌ای را مثال می‌آوریم. ما می‌دانیم که اصل آزادسازی انرژی با شکافت هسته‌ای در سال ۱۹۳۹ شناخته شد و احتمال استفادهٔ عملی از آن را لااقل ژولیو و همکارانش پیش‌بینی کرده بودند و آن را در CNRS [1] (مرکز ملی پژوهشهای علمی) به ثبت رسانیدند. تنها موقعیتهای خاص جنگی سبب شد که تلاشی که، برای اینکه بدون انگیزه‌های اقتصادی و نظامی به‌نتیجه برسد چند ده سال وقت لازم داشت، طی شش سال ببار نشیند. افزایش تعداد مرکز هسته‌ای، از سال ۱۹۷۳ به‌بعد، به‌علت رویدادهای اقتصادی و سیاسی معلومی، اسباب نگرانی است. چنانچه عدم دقت در ارزیابی ذخائر نفتی و نیز قدرت اقتصادی مربوط به جوامع بزرگ چند ملیتی نفتی و اهمیت منابع زغال‌سنگ جهانی را درنظر بگیریم، می‌توان بدین نتیجه رسید که عصر انرژی هسته‌ای تا میانهٔ سدهٔ ۲۱ آغاز نخواهد شد، بدین ترتیب، باید پرسید که خصلت انقلابی این تکنیک کدام است؟ از کارهای نخستین ماری کوری تا آغاز کاربرد انرژی هسته‌ای یک سده و نیم باید بگذرد ـ مدتی که برای گذار از ماشین ساوری به ماشینهای عظیم بخار نیمهٔ سدهٔ نوزدهم تقریباً کافی بود.

نمونه‌های دیگری که آقایان فوریا و سر آورده‌اند از همین زمره‌اند. موتورهای موشکها در سالهای ۲۰ و ۳۰ مورد مطالعه قرار گرفتند و گروه آلمانی کارشناسان، طی پنج سال آن را ساختند؛ موشک V_2 برای مقاصد مسالمت‌آمیز، ۲۰ تا ۴۰ سال بعد مورد استفاده قرار گرفت. توربورآکتور، ماشینهای عظیم حساب و رادار هم همین وضع را دارند. در این مورد باید به یادآورد که دقیقاً طی سالهای دههٔ ۳۰ بود که رشته رادیوالکتریسیته از دل الکترونیک بیرون آمد. نخستین پخش تلویزیونی به سال ۱۹۳۸ برمی‌گردد، و غیره. قبلاً گفتیم که بسپار (پلیمر)های بلند وینیلی و آکریلی ـ که اگر آلمان همهٔ امکانات مادی خود را وقف آماده شدن و سپس ادارهٔ جنگ نمی‌کرد می‌توانست آن را پیش از امریکا وارد بازار کند ـ در همین زمان تولید شدند. در واقع این انقلاب آشکار تکنیکی (یا

1. Centre National des Recherches Scientifiques

صنعتی)، بیشتر نتیجهٔ این واقعیت است که امریکا که در آن زمان از آثار نخستین جنگ بهره‌مند شده بود و دور از « خط مقدم» قرار داشت، توانست بازاری را که برای امریکا آغوش گشوده بود تصاحب کند زیرا غنای اقتصادی و صنعتی به آن امکان می‌داد که برای پژوهش و توسعهٔ نوآوریها بر پایهٔ اطلاعات دست اول خود سرمایهٔ عظیمی را وقف کند. این جنگ، کاری را که New deal امریکا هنوز به انجام نرسانیده بود تکمیل کرد.

همکاری دانش و فن: به ادعای آخرین نویسندگان بالا برمی‌گردیم. آنان می‌نویسند: «مبادلات قطع ناشدنی دانش و فن سامان یافتند و این یکی از علل تکامل است.» آیا می‌توان گفت که این کار ویژهٔ این دوره است؟ مشکل روابط دانش و فن گویا هنوز مبهم است. برخلاف عقیده‌ای که ابراز شده است علم همیشه مخزن اطلاعاتی نبوده است که تکنیک را تغذیه می‌کنند؛ حتی می‌توان گفت که تا زمانهای نسبتاً اخیر، عکس این رابطه بیشتر حاکم بوده است. اینکه گفته می‌شود همکاری دانش و فن تنها در زمان حاضر ایجاد شده، سخن نادرست است. در پیشگفتار مجلد سوم متذکر شدیم که مبادلات متقابل این دو رشته فعالیت بشری چگونه جان گرفت. در نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم، با سنتز رنگدانه‌های آلی، کاربرد جریانهای چند فاز برق، اختراع موتورهای دیزل و تکامل توربینهای بخار رابطهٔ این دو بتدریج نزدیکتر شد. راه‌حل مسألهٔ تثبیت نیتروژن جوّی در آغاز سدهٔ بیستم، داستان جالبی است که در اثر همکاری آقای نرنست و گروه کارکنان مؤسسه بزرگ آلمانی، که هزینهٔ آن را تقبل کرده بودند، به‌ثمر نشست. کمی بعد روشهای کراکینگ و رفورمینگ نفت به پیش کشیده شد و نتیجهٔ آنها تولید نایلون بود. در برههٔ میان دو جنگ جهانی نمونه‌های زیادی از این دست وجود دارد.

ساختارهای پژوهشهای علمی و تکنیکی هرچه بود مبادلات آنها طبیعتاً در مدت کمی از پایه‌های سازمانی برخوردار شدند. این سازمانها را آزمایشگاه‌های تحقیقاتی شرکتهای بزرگ شیمیایی، و . . . در اواخر سدهٔ گذشته به‌وجود آوردند. در صنعت الکتریک، متالورژی و رادیوالکتریسیته نیز همین وضع پدید آمد. گرچه در فرانسه CNRS (مرکز ملی پژوهشهای علمی) تا سال ۱۹۳۶ تشکیل نشده بود انستیتوها و بنیادهای متعددی در کشورهای دیگر از جمله در اتحاد جماهیر شوروی [سابق] از حدود نیم سدهٔ پیش فعال بودند. آکادمی علوم این کشور که کاملاً نوسازی شده بود قدرت خود را در تمام رشته‌های تحقیقاتی، چه علمی و چه تکنیکی بسط داد.

با آغاز سدهٔ کنونی پیشرفت رشته‌های بزرگ تکنیکی تثبیت شد. این پدیده بخشی با کمک ابزارهای محاسباتی بود که از رشته‌های علمی به وام گرفته شد ـ ابزاری که تا آن زمان کاربرد

محدودی داشت، مثل محاسبهٔ مقاومت مصالح در زمان رونق ساختمانهای فلزی و پلها. ورود محاسبه در تکنیک تنها این معنی را می‌دهد که تکنیک، سراسر دنباله‌رو دانش شده است. معمولاً از ادغام جزئی دو روش آفرینندگی، صحبت می‌شود که به پیدایش زمینهٔ مشترکی انجامیده است که ما بدان، برای سهولت کار، نام تکنولوژی را داده‌ایم. گرچه این اصطلاح در زبان فرانسه تا اندازه مبهم است، در زبانهای دیگر معنی گسترده‌تری دارد. نویسندگان دیگر برای این مفهوم اصطلاح: علم ـ تکنیک را به‌کار گرفته‌اند. آنان نوشته‌اند که «رشتهٔ الکترونیک می‌تواند نمونه‌های زیادی از محاسباتی شدن واقعی این علم ـ تکنیک را که بر پایهٔ مکانیک گازها و الکترون است و نتایج عملی بی‌سابقه‌ای داشته است به‌دست دهد. رشتهٔ الکترونیک دامنه‌ای چنان گستَرده دارد که المانها، تریودها، کلیسترون‌ها، مگنترونها و غیره، تا برسیم به رادار، تلویزیون ماشینهای محاسبهٔ الکترونیکی و ... را دربر می‌گیرد. در رشتهٔ ساختن لامپهای خلأ یا لامپهای مشتعل مثلاً در گازها، تفاوت دانشمند با تکنسین کاملاً از میان رفته است: Heilبا Varian برای لامپهای با تحمیل فرکانسی (۱۹۳۸)، Kampfner برای لامپهای با امواج رونده (۱۹۴۳)، غیره».

«سیالیت» تکنیکهای بنیادین: تنها مسأله‌ای که ناگفته مانده این است که دو مجلد باقیماندهٔ این اثر، با چه نوع نگرشی طرح و اجرا شده‌اند. زمانی‌که پیشرفت کلی تکنیکها، از یک سده پیش تا کنون، را مورد بررسی قرار می‌دهیم، می‌بینیم که این پیشرفت در مسیر تکامل تعدادی رشته‌های اساسی بوده است که تقریباً همهٔ زمینه‌های تولید و وسایل ارتباطی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. برای اینکه در انبوه جزئیات غرق نشویم ـ جزئیاتی که غالباً نمایش جانداری از تحول را هم نشان نمی‌دهند ـ کوشش شده است که این رشته‌ها، معین و برای تعیین ساختار این دو مجلد، به‌کار گرفته شوند. در این راه باید برخی از رویدادها را نادیده گرفت زیرا آنها مجموعاً ما را برای یافتن علتهای اساسی تکثیر خود در تنگنا می‌اندازند. در اینجا از فصلهای سنتی بررسی اتومبیل، راه‌آهن، فضاپیمایی ... خبری نیست. راه‌های آهن در حدود مجلد پیشین که زمان پیدایش آن را شامل می‌شد بررسی خواهند شد زیرا بدون داشتن اطلاعات کافی از اوضاع و احوال زمان راه‌اندازی آنها، سدهٔ نوزدهم، فهمیده نخواهد شد. اما مرحلهٔ پایانی تاریخ ما این‌طور نیست، اختراعات و یا اصلاحات فراوانی که وجه امتیاز عصر ماست، تنها ثمرهٔ نوعی همگرایی درکاربرد وسایل اساسی نسبتاً معدود است. این وسایل با تولید و انتقال انرژی، وضع آن روز شیمی صنعتی، استخراج فلزات و ساخت آلیاژها و بالاخره طبیعتاً با پیدایش رشتهٔ الکترونیک در دسترس قرار گرفتند.

امتیاز این تکنیکهای بزرگ سدهٔ بیستم، داشتن نوعی «سیالیت» است که آنها را شایسته عنوان

کلی تکنیک پیچیده می‌کند، تکنیکی که در چهار یا پنج دهۀ اخیر پایه‌گذاری شده است.

تکنیک یا تولید یا روش کار در دوره‌های پیشین، قدرت نوآوری محدودی داشتند. مثلاً چدن کاربردهای گوناگونی نداشت و تنها در بخشهایی، محققاً متعدد، اما به مقدار بسیار کم به‌کار گرفته می‌شد. آهن و سپس فولاد، تا زمانی‌که تولید آنها زیاد و ارزان نشده بود، همین وضع را داشتند. امکانات کاربرد فلزات، نسبتاً محدود بود؛ و بعدها زمانی‌که نخست مس به مقدار زیاد و سپس آلومینیوم رواج کامل یافتند گسترۀ کاربرد آنها فزونی گرفت. سرانجام، کروم، نیکل و بعدها تنگستن، تیتان و فلزات «کوچک» و ردیف آلیاژها که عملاً بی‌پایان هستند به بازار سرازیر شدند. از آغاز سدۀ حاضر در تهیۀ آلیاژها چنان افراط شد که مجموعۀ تولید متالورژی به چنان سیالیتی دست یافت که توانست تکنیک پیچیدۀ کنونی را پایه گذارد.

همین مطالب را در مورد تولید انرژی هم می‌توان تکرارکرد. موتور بخاری رفت‌وبرگشتی با وجود پیشرفتهای آن هنوز تکنیک خامی بود و بنابراین جای خود را به موتورهای درونسوز یا موتورهای برقی واگذاشت، میدان کاملاً بازی در برابر این تکنیکهای سیال باز شد و آهنگ نوآوری در این رشته به‌طور تقریباً عمومی سرعت گرفت.

برق صنعتی در مراحل نخستین پیشرفت، در بخش جریان مستقیم، تا مدتها از سیالیت نفوذ بی‌بهره بود اما زمانی‌که توانستند اشکال گوناگونی از جریانها را تولید کنند و بویژه زمانی‌که مشکل مربوط به انتقال و تغییر شکل آن رفع شد قابلیت نفوذ یافت. رادیوالکتریسیته که به فواصل دور انتقال می‌یافت تنها یک نوع کاربرد داشت که گرچه در آن زمان جالب‌توجه بود اما مورد استفادۀ زیادی نداشت، که از آن جمله فضانوردی و دریاپیمایی را می‌توان نام برد؛ ولی زمانی‌که الکترونیک از لامپهای ترمیونی و لامپهای خلأ فراتر رفت این محدودیت نسبی رفع شد. میدان تکنیکی مورد نظر بسرعت وسعت گرفت و زمانی‌که نیمرساناها آنها را در بخش جریانهای ضعیف مورد استفاده قرار دادند و مصالح حجیم تقریباً به‌طورکلی حذف شدند کاربرد آنها در واقع بی‌پایان شد.

روشهای شیمی صنعتی نیز جهش مشابهی داشتند. روشهای تولید مواد رنگی شیمیایی یا دست‌کاری سلولوز ظاهراً جهان دیگری از فراورده‌های شیمیایی پدید آورد که کاربردهای بسیار گوناگونی دارند. گرچه زمانی‌که آن را با کاربرد بسپارهای عالی که به روش سنتز کاتالیزوری به‌دست می‌آیند مقایسه کنیم بسیار محدود می‌باشند.

ساختار مجلدهای چهارم و پنجم: شماری از مشخصات تحول تکنیکهای نیم‌سدۀ کنونی شرح داده شد. این مشخصات در دو مجلد اخیر پایۀ کار ما هستند. اختراع اتومبیل، هواپیما، اتوماسیون را

تنها می‌توان از نتایج پیشرفت موتورها، پالایش نفت، تسلط بر ساختن آلیاژهای ویژه و دسترسی به جریانهای گوناگون برق دانست. نفوذ الکترونیک که تکثیر فرمانهای تشدیدی (سرو و مکانیسم) را سبب شده است، یا تغییر شکل مشخصات فیزیکی لایه‌ای از اکسید مغناطیسی و قرائت تغییرات ثبت شده در این کار مؤثر بودند.

از پراکنده بودن برخی مطالب همگان اطلاع دارند. و با شناختن این اجزای پراکنده، می‌توان به ساختار کلی آنها پی‌برده گرچه خواسته‌ایم از تک نگاره‌های ضد و نقیض، اسناد فراوانی که برای چنین کارهایی پرتگاههای مهیبی به‌شمار می‌روند، بپرهیزیم، متأسفانه کمبود اطلاعات، مراجعه بدانها را ناگزیر ساخته است. شاید این ادعا، که تاریخ ساخت اتومبیل و فضانوردی تقریباً ناشناخته مانده است تکان‌دهنده باشد. در حال حاضر تاریخ آنها در واقع داستانی آکنده از شوخیها و ثبت نمونه‌های تولید شده و رکوردهاست. جامعه‌شناسان و اقتصاددانان، به شکلی طبیعی و تا اندازه‌ای درست، سرگرم تدوین آن هستند اما هنوز بخش بزرگی از تابلوی تکنیک آن در سایه مانده است. جز تاریخ سازماندهی کار زنجیری، مراحل دیگر تولیدی آن، پیدایش پی‌درپی روشهای مونتاژ، تعویض قطعات قدیمی با قطعات بهتر، تکمیل تجهیزات الکتریکی، تحول سیستمهای روغن و غیره آن‌طور که باید بررسی نشده‌اند.

نواقص دیگر این تاریخ به ما اجازهٔ دستیابی به سطح اولیهٔ روشهای ساخت یا تولید را نمی‌دهد. گذشتهٔ ساخت لامپها و سیمهای برقی، سیم‌سازی، میخ‌سازی، پیچ‌سازی، جوشکاری و شکلدهی به فلزات، یا تاریک مانده، یا تا اندازه‌ای روشن شده است. ما توانستیم برخی از آنها را، گرچه به اختصار، تنظیم کنیم تا مقدمه‌ای برای این کار باشد؛ مثلاً ساخت کابلها در مبحث بالابرها. با این حال، ما در پرتو کار شایسته آقای ژاک پاین توانستیم تاریخ کاملی از یکی از این تکنیکهای اساسی به‌دست دهیم. هر زمان که تاریخ ماشینهای بخار مطرح می‌شود ظاهراً گمان می‌کنند که مرحلهٔ خود تولید بخار، در حقیقت تحصیل حاصل است و از تحول دیگهای بخار سرسری می‌گذرند، درحالی که دیگهای بخار در همهٔ مراحل تکاملی ماشینهای بخار، هم رفت و برگشتی و هم نوع گردان، مطرح بوده‌اند و غالباً نقش اصلی داشته‌اند. برای اینکه این رشتهٔ خاص در مجموع خود عرضه شده باشد باید اطلاعات جسته و گریخته‌ای را که در مجلدهای پیشین آمده است، در اینجا گرد آورد؛ پراکنده بودن این اطلاعات، اهمیتی را که آنها از آغاز کار تا کنون داشته‌اند، از دیدها پنهان ساخته است.

بدین ترتیب، دو مجلد باقیماندهٔ این اثر بر شمار نسبتاً کمی از رشته‌های صنعتی تکیه می‌کنند که با این همه بعضی از آنها گوناگونی فراوان دارند. منطقی است که با وسایل تولید انرژی، بخار،

احتراق درونی، شکافت هسته‌ای سخن را آغاز کنیم و با برق صنعتی که گرچه یک منبع انرژی نیست نوعی تکنیک انتقال انرژی یا تغییر شکل و محل آن است آن را ادامه دهیم. پس از آن به تولید فراورده‌های شیمی صنعتی و تکنیکهای استخراج و کار روی فلزات بپردازیم.

برای اینکه فرآیند ساخت قطعات ادامه یابد ظاهراً صنایع تغییر شکل آنها باید بخش دیگری را تشکیل می‌دادند. این بخش تنوع بسیار دارد و عملیات گوناگونی را شامل می‌شود که گاهی چند رشته از آنها را به‌طور قراردادی تحت یک عنوان بررسی می‌کنند اما به‌طور کلی انواع کارهای شکلدهی و مونتاژ اساسی قطعات را در بر می‌گیرد. این بخش شامل ابزارهای زمانسنجی، ماشینهای ابزار، شاخه‌های بزرگ ساخت، ماشینهای چاپ، اتومبیل‌سازی، ماشینهای کشاورزی و موتورهای راهسازی است. گنجانیدن ساخت بناهای صنعتی که در زمان ما به کارگاههای بزرگ تبدیل شده‌اند و کاربرد روزافزون مصالح پیش‌ساخته، در این بخش منطقی است.

بخش مهم دیگری از تمدن تکنیکی ما گردآوری اطلاعات، ابلاغ و نتیجه‌گیری از آنهاست. ما، البته بدرستی، مفهوم اطلاع‌رسانی را به مسایل ثبت و پخش صوت و تصویر گسترش داده‌ایم. عنصر اصلی این بخش، طبیعتاً، گسترش ارتباطات رادیویی و پیشرفت الکترونیک می‌باشد ـ چیزی که به پیدایی کامپیوتر انجامید.

با وجود تصمیمی که گرفته بودیم که منظرهٔ تکنیکی این اثر تا پایان حفظ شود، چنین می‌نماید که روابط بین عامل انسانی و تکنیکهای تولید را نباید از یاد برد. شکی نیست که در ادوار گذشته، مشکلات مربوط به کارگران صنعتی در تحول کلی تکنیکها تأثیری نیرومند داشته است. و دیده خواهد شد که این امر از آغاز عصر صنعتی وجود داشته است. بررسی فیزیولوژی کار که با دخالت مفهوم ارگونومی (شناخت قواعد کار) کمال یافت یکی از جنبه‌های این مشکلات است که با افزایش روزافزون سلطهٔ کارگاه بر انسانها، باید در نظر گرفته شود. سرانجام، هرکس می‌داند که در عصر ما، کار تولیدی، تنها می‌تواند در چارچوبی از تشکیلات کارگری و کارفرما، چارچوبی که در بهتر شدن آن، همواره کوشش شده است و از آغاز عصر صنعتی تا کنون روشهای حاکم بر آن پیوسته در حال تغییر بوده است. به پیش برود. فصل پایانی این کتاب در این موضوع بحث می‌کند و همراه دو فصل ماقبل، اگر نتوان آن را همچون نتیجهٔ بحث در نظر گرفت، لااقل پیشدرآمدی برای آن همکاری مورد علاقهٔ لوسین‌فور به‌شمار می‌آید.

موریس دوما

بخش اول

تولید انرژی

۱

ماشینها و توربینهای بخار

تحول انواع ساختاری و کارکردی

خوانندگان اکثر کتابهای تاریخ اقتصاد معمولاً این احساس را پیدا می‌کنند که تاریخ ماشین بخار در زمانی قطع می‌شود که کاربرد این ماشین در صنعت رواج یافته و کلاسیک شده است: میانهٔ سدهٔ نوزدهم. چنین احساسی از بن نادرست است. تفاوت یک ماشین دورهٔ لویی فیلیپ با مدلهای بسیار پیشرفته مربوط به آغاز سدهٔ بیستم لااقل همان اندازه زیاد است که یک ماشین نیوکامن با ماشین وات. می‌توان گفت که وات، با نوآوریهای خود، که مهمترین آن کندانسور جداگانه بود مصرف سوخت را به یک‌چهارم رسانید؛ یا از ۱۶ به ۴ کیلوگرم برای هر اسب بخار در هر ساعت. این پیشرفت با جهش ناگهانی پدید آمد. در دورهٔ پس از آن، برعکس، اصلاحات پشت سر هم پدید آمدند و گویا به‌همین جهت درخشش آنها زیاد نبود. گرچه مصرف با همین نسبت کم شد: یعنی برای هر اسب بخار در یک ساعت، مصرف سوخت از ۴ به ۱ کیلوگرم کاهش یافت. بعضی ماشینهای بسیار تکامل یافته، در حدود سال ۱۹۰۰، آن‌طور که می‌گویند، مصرفشان به‌طور متوسط، حتی از ۶۰۰ گرم بیشتر نبود. روشن است که این صرفه‌جویی، فی‌نفسه ارزش چندانی نداشت؛

تفاوت ۱۶ و ۴ برابر ۱۲ کیلوگرم است درحالی‌که ۱/۴ از ۳ کیلوگرم بیشتر نیست. اما این تفاوت برای اینکه مواردی، بویژه ناوبری در مسافتهای طولانی، امکانپذیر شوند، کافی بود ـ کاری که در گذشته عملی نبود.

دربارهٔ تحول واحدهای ماشینکاری، توانهای جرمی (توان بر کیلوگرم وزن ماشین) و فشارهای کارکردی سخن بسیار است. همهٔ این مسائل در زمینهٔ کاملاً مشخص خود بررسی شده‌اند.

ما در نخستین بند (پاراگراف) بسیار کوتاه خود، تحول صوری ماشینها یا به‌اصطلاح انواع ساختاری آنها را باز نمودیم. هر ماشین یک پیستون و یک محور دارد که اجزای انتقال‌دهندهٔ حرکت از یکی به دیگری می‌باشند؛ وضعیت حجمی آن نیز که انواع ساختاری ماشین را مشخص می‌سازد همین است. انواع این ماشینها برحسب طرز کار خود مشخص می‌شوند و اساساً به موتورهای ثابت، لوکوموتیوها، و موتورهای کشتی تقسیم شده‌اند.

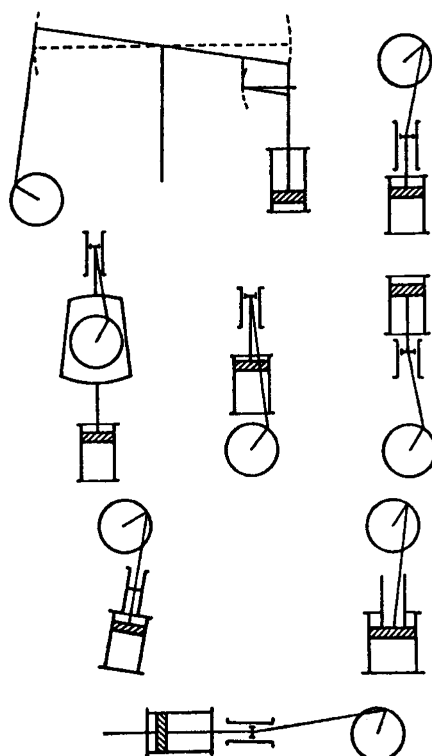
دو بند بعدی به طرز کار ماشینها مربوط می‌شود، یعنی چگونه قدرت بخار با فشار روی پیستون در داخل سلیندر، اعمال می‌شود.

اولی مربوط به روشهای ارزیابی قدرت ماشینها، از راه بررسی یا محاسبه است. در این قسمت، تاریخ مفاهیم اساسی ماشینهایی را که تا روزگار ما درکار هستند، و از آن جمله موتورها، را بازگویی می‌کنیم. این امر ما را به مسألهٔ تأثیر متقابل ترمودینامیک و ساختمان ماشینهای بخار، و نیز تبیین این نکته که برخی مسائل تا زمان پیدایش یک نظریهٔ خاص موسوم به نظریهٔ تجربی نمی‌توانستند حل شوند، رهنمون می‌شود.

دومی سراسر به مسأله اساسی دتانت (کاهش فشار) گاز می‌پردازد و به دو بخش تقریباً دارای ترتیب زمانی تقسیم می‌شود: نخست کاهش فشاری که در یک سیلندر ایجاد می‌شود و بعد کاهش فشاری که در چند سیلندر، پیاپی رخ می‌دهد: کاهش فشار چندگانه. ما با بررسی ماشینهای بخار پیستوندار، سخن را به پایان می‌بریم.

در پاراگراف بعدی به بررسی پیدایش و تکمیل توربینهای بخار می‌پردازیم. این توربینها هنوز برای ایجاد قدرت زیاد، رایج هستند.

سرانجام، پاراگراف پنجم یا آخری به تاریخ دیگهای بخار و کندانسورها تعلق دارد. گرایش فراوانی دیده می‌شود که از این دو وسیله نامی برده نشود زیرا به غلط آنها را از ضمائم کار به‌شمار می‌آورند. نقش آنها همیشه برجسته بوده است و همواره مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بویژه کندانسورها با کاربرد توربینها اهمیت فراوان یافتند زیرا می‌توانستند کاهش فشاری بسیار بیشتر از ماشینهای بخار پیستونی داشته باشد.



شکل ۱.نمای اجمالی انواع کارکردی ماشینهای بخار. از چپ به راست و از بالا به پایین: شاهنگی، عمودی با عمل مستقیم، ناقوسی، عمودی با شاتون بازگشتی (ماودزلی)، هاونی، نوساندار، جعبه‌ای، افقی با عمل مستقیم.

ماشینهای ثابت

همان‌طورکه در مجلد قبلی آمده است در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم ماشینهای بخار شاهنگی به‌کار می‌رفتند. طی همین دوره انواعی از ماشینهای بخار رواج یافتند: ماشین بخار عمودی با عمل مستقیم (پیستون مستقیماً روی میل‌لنگ عمل می‌کند ـ م) یا محور در بالا، ماشین بخار میزی ماودزلی، ماشین بخار شاسی‌دار فارکو، ماشینهای نوسانداری که در کشتیها به‌کار گرفته شدند، و ماشینهای به‌اصطلاح ملخی *grasshopper* که نوعی از ماشینهای بخار شاهنگی با قدرتهای کم بودند که از آن منشعب شدند (شکل ۱).

سرنوشت این ماشینهای بخار با آن‌همه گوناگونی ساختاری، در نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم چه بود؟ همهٔ آنها کنار گذاشته شدند و تنها ماشین با دیگ بخار شاهنگی مدت زیادی در کار باقی ماند، بنابراین، جا دارد که چند کلمه‌ای دربارهٔ آن بگوییم.

ماشین بخار شاهنگی: بی‌فایده نیست که بدانیم از این گروه ماشین بخار، لااقل سه نوع آن بر پایهٔ مقاومت مختلف توان ـ به‌کار گرفته می‌شدند.

هر سه نوع این ماشینهای بزرگ، در حقیقت بدون پایه بودند و آنها را در اسکلت ساختمان محکم می‌کردند و قطعات اساسی ماشین مستقیماً روی این اسکلت تکیه داده می‌شدند. وضع ماشین بخار کورنوال و تلمبه‌های عظیم و یکطرفه آن، که طرز کار آنها بعدها بتفصیل خواهد آمد چنین خواهد بود. ماشینهای بخاری که آقای بلگران[1] در عهد امپراطوری دوم در شایو[2] نصب کرد از همان نوعی بودند که آقای ژاک کنستانتن پریه در زمان لویی شانزدهم ساخته بود.

اما، برعکس، ماشینهای شاهنگی با قدرت کم، پایه‌های بسیار ضعیفی به‌شکل A داشتند که انگلیسیان بدان *A-frame* می‌گویند. آقای فارکو از این نوع ماشین هم در فرانسه ساخته است.

نوعی که بیش از بقیهٔ ماشینهای شاهنگی رواج یافت ماشینی با شش ستون بود که یک قرنیز مستطیلی را سرپا نگاه می‌داشتند و جملهٔ این دستگاه بشیوهٔ معماری کلاسیک به سلیقهٔ روز ساخته می‌شد. موتورهایی که معمولاً در صنعت کار می‌کردند از همین نوع بودند. بویژه در فرانسه ماشین دو انبساطی، که ماشین وولف نامیده می‌شد، رواج عمومی یافت. در صنعت نساجی این ماشین با استقبال گرمی روبه‌رو شد و کاربرد آن بیشتر از بقیه پایدار ماند. این امر نتیجهٔ پیدایش سازندگان محلی آنها در شمال و نورماندی بود. این واقعیت بسیار عجیب است زیرا ساخت ماشین بخار در اطراف پاریس کاملاً متمرکز شده بود. در نمایشگاه جهانی سال ۱۸۸۹ تنها یک ماشین شاهنگی دیده می‌شد که ساختهٔ دست یک مکانیسین اهل نورماندی بود. این احتمالاً یکی از آخرین ماشینهایی بود که آنها ساخته بودند. باید روی دوام استثنایی موتورهای قدیمی انگشت گذارد. ماشینهایی که در سالهای ۱۸۲۵ ـ ۱۸۳۰ ساخته شده‌اند یا به‌دست شتهلین آلزاسی یا بولتون و وات برای کارخانهٔ لوگلباخ[3] بودند ـ که ما بدانها باز خواهیم گشت ـ این ماشینها تا سالهای ۱۹۲۵ ـ ۱۹۳۰ اوراق نشده بودند.

---

1. Belgrand

۲. Chaillot: کاخی که در سال ۱۹۲۷ بوسیلهٔ دو معمار فرانسوی ساخته شده است.

3. Logelbach

ماشین افقی: از سال ۱۸۵۰ ماشین افقی رواج فراوان یافت. این ماشینها علاوه‌بر کاربردی که در لوکوموتیوها داشتند بوسیلهٔ چند ماشین‌ساز لندنی با نامهای تیلور و مارتینو[1] (مجلد سوم، صفحه۱۰۶) در حدود سال ۱۸۲۵ جهت مقاصد دیگری ساخته شدند. در فرانسه، آقای آلت از آراس در سال ۱۸۴۷ دو ماشین افقی با قدرت ۲۰۰ اسب برای تلمبه تخلیهٔ هوا جهت راه‌آهن سن ـ ژرمن ساخت. در این زمان متوجه شدند که عقیدهٔ رایج مربوط به بیضی شدن مقطع استوانه تلمبه به‌علت رفت‌وآمد پیستون، بی‌پایه است. نمایشگاههای جهانی لندن در سال ۱۸۵۱ و پاریس در سال ۱۸۵۵ شاهد سلطهٔ ماشینهای افقی بودند. این سلطه تا سالهای حدود ۱۹۲۰ و پایان کار تلمبه‌های تخلیه‌ای پیستوندار ادامه داشت. تلمبه‌های با جریان یکنواخت، که دربارهٔ آنها باز سخن خواهیم راند، عموماً از ماشینهای افقی بودند. اما حالت افقی آنها در موتورهای دیزلی حفظ نشد، گرچه گاه‌گاهی از آنها به‌عنوان موتورهای پرقدرت گازی کوره‌های بلند استفاده شده است.

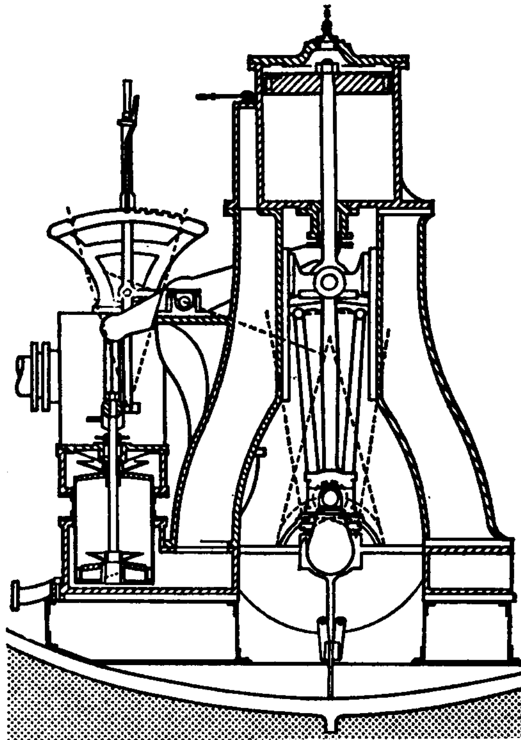
ماشینهای هاونی: در حدود سال ۱۸۷۵ نوع دیگری ماشین به‌کار گرفته می‌شد، ماشین عمودی با سیلندرهایی که در بالای آن کار گذاشته می‌شد، مثل چکشهای هاونی. به همین جهت این ماشینها، هاونی نامیده شدند. ماشینهای هاونی و افقی همگام رواج یافتند اما نوع هاونی هنوز هم در موتورهای دیزلی فعال است. ما در بحث راجع به ماشینهای کشتی، باز بدانها خواهیم پرداخت (شکل ۲).

مآخذ ماشینهای هاونی بدرستی شناخته شده نیستند. پیش از سال ۱۸۶۰ آقای نازمیث یکی از این نوع را به‌عنوان موتور نوردکاری ساخت. حدود سال ۱۸۶۵ آقای بنژامن نورمن از آنها برای حرکت کشتی استفاده کرد. ماشینهای هاونی به نظر ما در فاصلهٔ زمانی دو نمایشگاه ۱۸۷۸ و ۱۸۸۹ رواج زیادی یافتند. آقای امه ویتز دربارهٔ آن سخن رانده است.

بعدها این وضع تثبیت شد. هر دو نوع، از جنبهٔ مکانیکی ارزش یک‌سانی داشتند. بویژه هرکدام از آنها را برای انبساطهای چندگانه آماده ساختند. اما از لحاظ فضایی که اشغال می‌کردند بین این دو نوع تفاوت بسیار بود. ماشین افقی کوتاه بود اما سطح زیادی می‌گرفت؛ ماشین هاونی بلند بود اما سطح کمی را اشغال می‌کرد. ما بعداً دربارهٔ اهمیت ابعاد آنها، بویژه در مورد ماشینهای پرقدرت سخن خواهیم گفت و نشان خواهیم داد که مزاحمت بزرگی آنها اغماض‌پذیر نیست. سخن آخر اینکه در زیر نام *Manhattan engine* ماشینهای بسیار پرقدرتی، گویا ساخته امریکا، جای داشتند که یک ماشین افقی و یک ماشین هاونی را در روی یک بازو به یکدیگر متحد می‌کردند.

---

1. Martineau



شکل ۲.مقطع عرضی یک ماشین هاونی که در بدنه یک کشتی نصب شده است. چپ کندانسور و تلمبهٔ هوا.

لوکوموبیل‌ها، راهپیماها، ماشینهای نیم‌ثابت

نمونه‌های اولیه: علاقه به تبدیل ماشین بخار با قدرت متوسط به یک وسیلهٔ قابل انتقال، برای منظورهای گوناگون و محلهای مختلف، به‌طور نابه‌هنگام پدید آمده بود. اما در نیمهٔ نخستین این سده، تنها نمونه‌های استثنایی از آن وجود داشت. اطلاع از اینکه شاگردان هنرستان شالون ـ سور ـ سون[۱] در سال ۱۸۱۹ در نمایشگاه صنایع ملی، برای ساختن یک ماشین بخار متحرک جایزه‌ای دریافت داشتند شگفت‌انگیز است. این ماشین دارای برخی خصوصیات لوکوموبیل آینده بود. بخصوص باید شباهت آن را با لوکوموتیو یادآور شد ـ شباهتی که پایدار ماند. شاگردان این هنرستان، یا به‌عبارت

۱. Chalon-sur-Saôn شهری در شرق مرکز فرانسه، در بورگونی، کنار رود سون.

باید شباهت آن را با لوکوموتیو یادآور شد ـ شباهتی که پایدار ماند. شاگردان این هنرستان، یا به‌عبارت بهتر می‌توان گفت، استادان آنها بی‌شبهه از نخستین لوکوموتیوهای بلنکینسوپ و استیونسن و نیز از ماشینهای پرفشار ترویثیک بی‌اطلاع نبودند. سیلندرهای عمودی آن در دیگ بخاری که کوره در داخل آن بود، بالا و پایین می‌رفتند. اما این ماشین کندانسوری داشت که در زمان توقف در جنب منبع آب سرد، کار می‌کرد.

کمی بعد، ماودزلی، ماشین‌ساز پرآوازهٔ انگلیسی لوکوموبیل‌هایی با دو گروه چرخهای مستقل ساخت. که گروهی از آنها برای دیگ بخار و گروه دیگر برای خود ماشین بود. یکی از این ماشینها مطمئناً پیش از سال ۱۸۳۰ به فرانسه وارد شده بود و در بندرگاه لوریان کار می‌کرد. آلت، ماشین‌ساز سرشناس آراس، برای بندر شربور، یک کپی از آن را ساخت، که از سال ۱۸۳۱ به‌کار گرفته شد.

اما همهٔ این مطالب، مقدمهٔ بحث را تشکیل می‌دهند. لوکوموبیل‌های کلاسیک، ریشه در کشاورزی دارند و به همین علت نخست درکشورهایی ساخته شدند که پیشرفت ماشینهای کشاورزی در آنها بسیار پیشرس بود؛ یعنی کشورهای انگلیس و ایالات متحدهٔ امریکا. دلیل این امر، انطباق این ماشین با شرایط اجتماعی ـ اقتصادی آن کشورها بود. وجود زمینهای بزرگ زراعی، درعین‌حال هم سطوح بزرگ و هم سرمایه‌های گزاف را به‌آسانی در اختیار می‌گذاشت؛ شرایطی که کاملاً معکوس وضع فرانسه بود.

کاربرد نیروی محرکهٔ بخار در ممالک متحدهٔ امریکا در سال ۱۸۰۷ درکشتزارهای بزرگ جنوب آغاز شد. اما نخست تنها از ماشینهای ثابتی استفاده می‌کردند که اره‌ها، آسیابهای غله یا نیشکر، ماشینهای حلاجی و وش‌زنی پنبه به‌کار می‌انداختند. در سال ۱۸۳۸ تعداد این ماشینها به ۵۸۵ عدد بالغ می‌شد.

طبق انتشارات اخیر امریکا، ماشینهای بخار متحرک که بر چرخهایی قرار داشتند، چه در شمال امریکا و چه در جنوب آن، تا سال ۱۸۴۹ وجود نداشتند که اسب آنها را جابه‌جا می‌کرد. این ماشینها با قدرتی برابر ۱۰ یا ۲۰ اسب ساخته شدند و بهای آنها حدود ۱۰۰۰ دلار بود.

آغاز پیشرفت: در انگلستان باید گفت که در نمایشگاه جهانی سال ۱۸۵۱ لندن، می‌توانستند با ۱۸ نوع لوکوموبیل‌های گوناگون آشنا شوند که اغلب آنها ساخت بریتانیا بود. سه نفر از بهترین سازندگان آنها آقایان: کلیتون ـ شاتل‌ورث[1]، تاکسفورد[2]، هورنسبای[3] بودند. آقای آرتور مورن یکی از این لوکوموبیل‌ها را از آقای تاکسفورد برای کنسرواتوار پیشه و هنر خرید ـ وسیله‌ای که هنوز در آنجا نگهداری می‌شود. متأسفانه این نمونه بد انتخاب شده بود، مکانیسمی بسیار پیچیده و ظریف

1. Clayton-Shuttleworth 2. Tuxford 3. Hornsby

داشت. این سیستم هیچ رواجی نیافت و اقتباسی از آن به‌عمل نیامد. این خرید افتخاری برای مکانیسین سرشناس فرانسوی حسن شهرتی کسب نکرد. فرانسوا کالا، با هشیاری بیشتر، ماشین کلیتون ـ شاتل‌ورث را تقلید کرد و با استقبال زیاد روبه‌رو شد و صنعت لوکوموبیل‌سازی فرانسه آن را پایهٔ کار خود قرار داد. کالا در سال ۱۸۵۶ تعداد ۳۰۰ دستگاه ماشین ساخت که نمایندهٔ قدرتی برابر ۲۰۰۰ اسب بود. در سال ۱۸۶۲ این تعداد سه برابر شد. آقایان روفه، آنژوبو[1]، فلود[2]، دورن در همین راه گام برداشتند. دو نفر اخیر، به بررسی ماشینی با سرعت نسبتاً زیاد پرداختند تا بدون اینکه وزن ماشین افزایش یابد قدرت آن بیشتر باشد.

یک لوکوموبیل کلاسیک چگونه است؟ آقای امه ویتز وصف روشنی از آن دارد: «دیگ بخار آن مانند دیگ بخار لوکوموتیوها از نوع لوله‌ای (دودی) است تا مقدار زیادی بخار بسرعت ایجاد کند. این دیگ حامل ماشین، که افقی است و نیز «تلمبهٔ تغذیهٔ آب» می‌باشد. این مجموعه چنان بر روی چرخها قرار گرفته است که چند اسب می‌توانند آن را بکشند. موتور آن بدون میعان و دارای فشار زیاد است. بخار آن وارد شومینه می‌شود تا اینکه عمل کشش بخار انجام گیرد، اما کشش آنچنان شدید نیست که زغال‌سنگهای نیم‌سوخته به بیرون پرتاب شوند، زیرا، دراین‌صورت، در کشتزارهایی که غالباً از این موتور استفاده می‌کنند ناراحتیهای بزرگی ایجاد می‌شود.»

آقای لویی فیگیه می‌افزاید که «لوکوموبیل روستا را همان‌قدر می‌توان در ردیف ماشینهای بخار به‌شمار آورد که ساعت دارکوبی (چوبی) موزه نوار (جنگل سیاه) را ساعت: وسیله‌ای بسیار زمخت اما مناسب.» شرایط کاری آن در واقع بسیار سخت هستند. این ماشین باید بتواند در راههای ناهموار حرکت کند، تحمل هوای بد را داشته باشد، و بالاخره بویژه بدون اینکه مواظبت چندانی از آن به‌عمل آید دوام بیاورد. حداکثر وزن آن نباید از ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بیشتر باشد.

در دوران امپراطوری روم، نمونه‌ای با قدرت چهار اسب و وزن دو تن به مبلغ ۴۰۰۰ فرانک دادوستد می‌شد. این وسیله طی ۱۰ ساعت کار، مقدار ۱۷۶ کیلوگرم زغال و ۱۴۵۰ لیتر آب مصرف می‌کرد. در آن زمان می‌توانستند ۷۵ هکتولیتر غله را بکوبند. دیده می‌شود که مصرف زغال آن ۴/۴ کیلوگرم در هر ساعت برای هر اسب است که مقدار زیادی است. در سال ۱۸۷۰ توانستند مصرف آن را تا ۲ کیلوگرم در ساعت برای هر اسب، تنها برای ماشینهای با قدرت چهار اسب، پایین آورند.

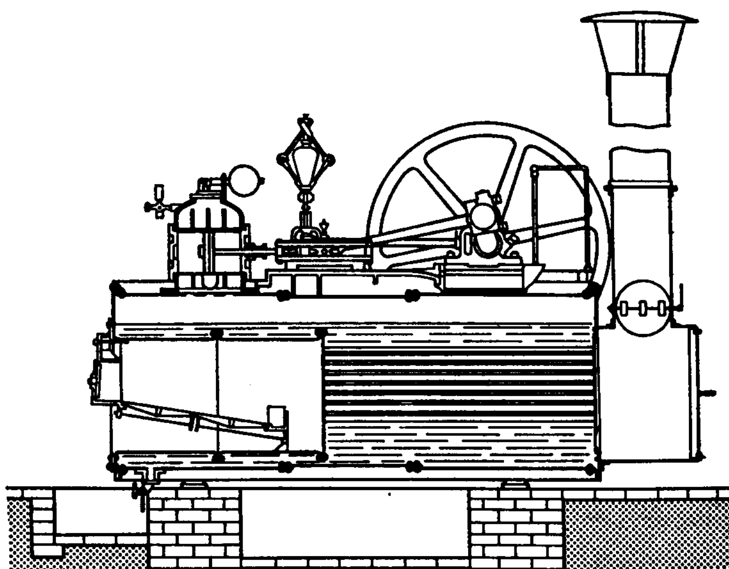
در مورد کاربرد آن در بخش کشاورزی باید گفت که در سال ۱۸۶۰ آزمایشهای چندی برای شخمزنی، درو، و حتی کرت‌بندی با آن به‌عمل آمد که دنبال نشد. تنها کاربرد آن به عنوان

1. Anjubault 2. Flaud

خرمنکوب، معمول شد. در کارهای ساختمانی، کاربرد لوکوموبیل رونق چشمگیری یافت؛ مثلاً از عمیق کردن سطح آب کانال سن ـ مارتن بوسیلهٔ آن صحبت می‌شود ـ کاری که در سال ۱۸۶۰ پایان گرفت. لوکوموبیل‌های زیادی در خشکانیدن، خاکبرداری، حمل مصالح و خرد کردن سنگها و مخلوط‌سازی شن با سیمان فعال بودند.

راهپیماها: یک لوکوموبیل را می‌توان به‌آسانی طوری ساخت که به‌عنوان لوکوموتیو راهپیما کار کند. بسیاری از پژوهشگران به امید حل مسألهٔ مکانیکی کردن وسایل حمل‌ونقل در این بخش کار کردند (مجلد سوم، صفحات ۳۷۵ تا ۳۸۵). در این راه با اینکه از دیگهای بخار مناسب لوکوموتیو استفاده کردند هیچ موفقیتی به‌دست نیاوردند. با این‌همه، در سالهای ۱۸۷۰ ـ ۱۸۸۰ در ساخت لوکوموبیل‌ها تغییر کلی داده شد و درحالی‌که باز آن را لوکوموبیل می‌نامیدند در حقیقت تنها به ساخت لوکوموتیوهای راهپیما می‌پرداختند و غالباً آنها را راهپیما می‌نامیدند که می‌توانست با موتور ثابتی کار کند. بیش از هرچیز، خرمنکوب متحرک می‌ساختند که آن را از کشتزاری به کشتزار دیگر انتقال می‌دادند، «لوکوموبیلی» آن را می‌کشید و به‌کار می‌انداخت. حدود سال ۱۸۷۶ بود که ارتش فرانسه کوشید تا راهپیماها را برای حمل توپخانه به‌کار گیرد. یک ماشین با قدرت هشت اسب در آن زمان بسیار سنگین بود و می‌توانست توپهای ۲۲ تنی را به‌دنبال بکشد گرچه سرعت آن در هر ساعت از هشت کیلومتر فراتر نمی‌رفت. برتری آن نسبت به کشتی یا قاطر آن‌قدرها نبود که این کار را بتوان تحولی نامید و به‌کارگیری قاطر برای این کار ادامه یافت.

ماشین نیم‌ثابت: ماشینهای نیم‌ثابت گروه مهم دیگری را تشکیل می‌دهند. در مورد آنها باید ابهاماتی را برطرف ساخت زیرا نویسندگانی درگذشته آنها را لوکوموبیل‌های صنعتی نامیده‌اند. اما این ماشینها روی چرخها حمل نمی‌شدند، بلکه حجمهایی بودند که جابه‌جا کردن آنها در صورت نیاز دشوار نبود، به بخاریهای فرنگی شباهتی داشتند. بهترین نمونهٔ پاریسی آنکه در سال ۱۸۶۰ وجود داشت ساخت کارخانهٔ هرمان ـ لاشاپل بود. تنهٔ این ماشین از یک سکوی گرد و یک پل تشکیل شده بود. دیگ بخار آن عبارت بود از حلقه‌ای از لایهٔ آب بین دو تیغه فلزی و لوله‌های آب که از داخل یکدیگر را قطع کرده بودند. سیلندر آن‌هم عمودی و به پایین یکی از ستونهای پل محکم شده بود. محور آنکه در قسمت فوقانی قرار داشت. همراه با چرخ طیار یا فلکهٔ آن در طرف مقابل میل‌لنگ بودند. ماشین نیم‌ثابت هرمان ـ لاشاپل در اواخر امپراطوری دوم در بخش صنایع کوچک پاریس رواج بسیار یافت ـ رواجی که تا مدتها ادامه داشت. آقای بوله مدیر کارگاهها و سازندهٔ این مدل در سال ۱۸۷۹ در رأس این مؤسسه قرار گرفت. ماشینهای نیم‌ثابت آقای بوله دارای قدرتی از



شکل ۳.ماشین نیم‌ثابت وولف.
دیگ بخار لوله دودی که سکوی بخش مکانیکی ماشین را تشکیل می‌دهد.

یک تا چهار اسب با دتانت ثابت و شش تا بیست اسب با دتانت تنظیم‌پذیر بوسیلهٔ رگولاتور بودند.

در فرانسه طبق فرمانی به تاریخ ۳۰ آوریل ۱۸۸۰ استفادهٔ آزاد این ماشین در هر کارگاه مجاز شمرده شد. اما از این تاریخ به بعد بود که در صنایع کوچک، بویژه در پاریس، کار زندانیان با اعمال شاقه که مجبور به گردانیدن میل‌لنگ بودند در بیشتر جاهها به یک موتور کوچک واگذار شد.

در اواخر سدهٔ نوزدهم دو مدل دیگر از ماشینهای نیم‌ثابت اهمیت یافتند. می‌بایست از ماشین دیوی ـ پاکسمن[1] با دیگ بخار افقی نام برد. در این زمان که دوران اولیه الکتروتکنیک بود، این ماشین غالباً در مراکز الکتریکی کوچک به‌کار گرفته می‌شد. مدل دیگری که بسیار متداول هم بود ماشین نیم‌ثابت وولف از ماگدبورگ با دیگ بخار افقی و کورهٔ تعویض‌پذیر بود (شکل ۳). این سیستم در سالهای ۱۸۶۰ بوسیله آقایان توما، لورنس، و پرینیون به ثبت رسیده بود. معلوم نیست که سازندهٔ آلمانی این ماشین برای ساخت آن چه شرایطی پیشنهاد می‌کرد. آقای وولف در سال

1. Davey-Paxman

۱۹۰۰ تخمین می‌زد که از سال ۱۸۶۲ به بعد حدود ۸۰۰۰ عدد از این ماشین تهیه کرده است. مصرف سوخت این ماشین به برکت ساخت بسیار تکمیلی آن، که بخار داغ تولید می‌کرد، روکش، دتانت تنظیم‌پذیر و دو انبساط برای قدرتهای بسیار بالا، در سال ۱۹۱۴ بسیار پایین آمده و به ۶۰۰ گرم زغال در هر ساعت برای یک اسب رسیده بود.

ماشین‌ابزارهای بخاری

در سالهای ۱۸۴۰ ـ ۱۸۶۰ ماشین‌ابزارهای متعددی ساخته شده که ماشین بخاری در دل خود داشتند. آقایان لئونس توما و کامی لورنس از پیشگامان کاربرد این نوع ماشین‌ابزار در فرانسه بودند. مثلاً ساخت چکشهای مکانیکی، دستگاههای نورد، غلتکهای کاغذسازی، ماشینهای کوبیدن تیر در زمین از برکت این مکانیسم است.

اما زمانی‌که کار مورد نظر، مستقیماً بوسیلهٔ دستهٔ پیستون انجام گرفت موضوع کمی فرق کرد. مهمترین ماشین‌ابزار از این دست، چکشهای هاونی می‌باشند که لزومی نمی‌بینیم در اینجا آنها را بررسی کنیم(رجوع کنید به جلد سوم، صفحات ۲۱۷ تا ۲۲۱). ماشینهای دیگر با عمل مستقیم، دمهای پیستوندار کوره‌های متالورژی هستند؛ اختراع این دمها و نیز تلمبه‌های یکطرفه به ویلکینسون نسبت داده شده است. تلمبه‌های شاهنگی یکطرفه ـ که حرکت درونی ایجاد نمی‌کردند ـ شباهت آشکاری به ماشینهای با اثر مستقیم داشتند.

بدین‌ترتیب، در چنان اوضاعی در استفاده از اصل دوران تعللی نشد؛ این اصل که بر پایهٔ کاربرد یک چرخ طیار قرار داشت کار را بسیار منظم می‌کرد. این کار به‌هیچ‌وجه مانع گذاردن پیستون دمشی روی همان دستهٔ پیستون موتور نمی‌شد ـ کاری که آقایان توما و لورنس عملی کردند و مجموعهٔ دستگاه را شکل افقی دادند (۱۸۵۳).

در ماشینهای تغذیه‌کنندهٔ آب دیگهای بخار کشتی، از نوع «اسب کوچک» نیز همین مکانیسم وجود داشت. حرکت دورانی آن تنها برای محدود ساختن حتمی رفت پیستون و به بازی گرفتن فلکهٔ ناظم بود. «اسب کوچک» تغذیه‌کنندهٔ آب از سال ۱۸۶۲ در کشتیهای فرانسه اجباری شد.

قیچیها، منگنه‌ها و پرچ‌کننده‌ها: در مجلد پیشین (صفحات ۷۶۳ تا ۷۶۷) تفاوتهای قیچی، منگنه و پرچ‌کننده‌های بخاری سال ۱۸۳۶ ساخت آقایان کاوه، فیربیرن، آلت، بویژه لوکروزو را برشمردیم. در اینجا به ذکر این نکته اکتفا می‌کنیم که دستگاه قیچی کاوه می‌توانست ورقهای آهن به ضخامت ۱۰۰ میلیمتر را در حالت سرد «به‌آسانی یک ورق مقوا» ببرد. همان‌طورکه دیده می‌شود، باید از

کم جلوه دادن قدرت این دستگاههای ماشین‌سازی اواسط سدهٔ نوزدهم پرهیز کرد. ساخت چنین ماشینهایی در آن روزگار بدون استفاده از نیروی بخار هرگز امکان نداشت. می‌توان سیستمهایی تصور کرد که از ترکیب چرخاب و پرسهای هیدرولیک برای این کار ساخته شده‌اند. این واقعیت که در آن زمان این ترکیب نمی‌توانست عمومیت داشته باشد کافی است تا بپذیریم که اجرای آنها در اکثر موارد بسیار دشوار بوده است. در حالت خاص و در موقعیتهای مناسب در کارگاههایی اجرا می‌شدند که به وسایل انرژی هیدرولیک، کاملاً مجهز بودند. این امر مثلاً در کارگاه آریستید برژس در لانسه[1] فراهم شده بود. همهٔ انرژی لازم برای کارها در آن زمان از طریق ترکیب توربین و جک پیچی تأمین می‌شد. با این‌حال، تا سال ۱۸۸۰ بخار به‌علت انعطاف زیاد کاربرد آن، راه‌حل عملی آن باقی ماند.

تجهیزات برای کارهای عمومی: برای اینکه هیچ نکتهٔ اساسی ناگفته نماند باید از کاربرد بسیار گستردهٔ جراثقالها و لایروبهای بخاری نیز سخنی به میان آورد. وسایل گفته شده علاوه‌بر کشتیهای بخاری است. دراین‌باره، بویژه در مورد جراثقال، ما مواجه با ماشینهایی هستیم که تا حدودی پیش‌نمونهٔ آنها مکانیسم لوکوموبیل بوده و ظاهراً از آن نتیجه شده‌اند.

در مورد تحول بعدی این نوع ابزارها، اطلاع چندانی نداریم. انتقال هیدرولیکی حرکت، هوای فشرده و بالاخره موتورهای برقی، و حتی در مواردی موتورهای درونسوز بتدریج جانشین ماشینهای بخار شدند. ماشین ابزارهای بخاری «با عمل مستقیم» که در عهد امپراطوری دوم، عصر طلایی خود را یافته بودند در حدود سالهای ۱۸۷۸ ـ ۱۸۸۱ بتدریج برای همیشه از میان رفتند (رجوع کنید به مجلد پنجم، بخش دوم، فصل ۳).

رگولاتور؛ سروموتور

ماشین بخار، ساخت و پیشرفت چندین نوع وسیلهٔ اطمینان یا فرمان را ممکن ساخت که گرچه مجالی برای بررسی آنها نیست، معمولاً اهمیت زیادی دارند.

رگولاتور (ناظم) وات: دیده شد (مجلد سوم، **صفحهٔ ۸۸**) که چگونه وات توانست رگولاتور گلوله‌ای یا رگولاتور مرکزگریز را در ماشینهای دورانی به‌کار برد. تلمبه‌های یکطرفه در ابتدا که تنها برای تلمبه‌زنی آب ساخته می‌شدند یک رگولاتور جریان داشتند که آن را کاتاراکت می‌نامیدند، این وسیله با تنگ و گشاد کردن مقطع لولهٔ رابط استوانه با کندانسور عمل می‌کرد. کاتاراکت در ماشینهای کورنوال هم گذاشته می‌شد. زمانی‌که رگولاتور مرکزگریز با ماشینهای دورانی دوطرفه ساخته شد

1. Lancey

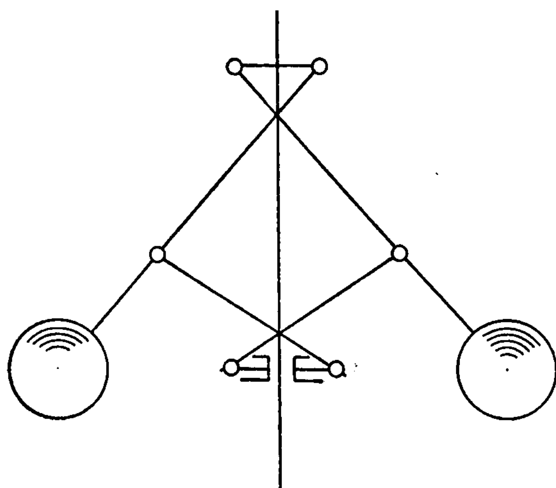
سوپاپ به لولهٔ ورودی بخار انتقال یافت.

ایزوکرونیسم (ثبوت زمانی): آونگ مخروطی، نامی که به ساختهٔ دستهای آقای وات داده شده بود، یک عیب ساختاری بسیار مهم داشت ـ هر سرعتی که این آونگ با آن تعادل می‌یافت، یعنی گویها تمایلی نه به پایین آمدن و نه به بالا رفتن داشتند، سرعت کار دستگاه نامیده می‌شد. بدین‌ترتیب، این گویها با جابه‌جا شدن خود، قوسهایی از دایره تشکیل می‌دادند. نتیجهٔ چنین وضعی این بود که هرقدر گویها بالاتر باشند سرعت کار دستگاه بیشتر است. بنابراین امکانی، لااقل نظری، برای دستگاه حاصل می‌شد که دارای سرعتهای گوناگون باشد. در عمل می‌توان گفت که رگولاتور آقای وات می‌توانست بدون اینکه به تغییرات سرعت، ثبات مطلقی بخشد آنها را محدود کند.

رگولاتوری که سرعت تعادل آن برای همه وضعیتهای گویها ثابت بود دارای ثبوت زمانی خوانده می‌شد. در سدهٔ نوزدهم این کیفیت هم مدتی تحت بررسیهای زیادی قرار گرفت. آن را بسادگی با این محاسبه که یک گوی رگولاتور بر روی همهٔ نقاط یک سهمی برای سرعت واحد دارای تعادل خواهد بود، تعیین می‌کردند. فهم این نظریه گرچه ساده است، اجرای آن بسیار دشوار می‌باشد. این وضعیت مشابه موردی است که در نورشناخت پیشنهاد شد عدسیهای غیرکروی ساخته شوند. آقای فرانکه[1] برای این کار از راهنماهایی استفاده کرد که یک سهمی رسم می‌کرد. آقای فارکو به‌جای سهمی از دایرهٔ بوسان (osculateur) خود در وضعیت میانگین کره‌ها استفاده کرد و رگولاتوری با بازوهای متقاطع ساخت (شکل ۴)؛ راه‌حلی بسیار عالی! اما راه‌حلی که در عمل بیشترین رواج را یافت، پیشنهادی آقای پورتر بود. در این راه‌حل بوشنی وزین در ته لولهٔ رگولاتور نصب می‌شد تا نوعی ثبوت زمانی کم‌وبیش واقعی ایجاد شود با در نظر گرفتن اینکه مسافتی را که لوله طی می‌کرد و برابر جابه‌جایی عمودی گویها بود (شکل ۵).

دتانت تنظیم‌پذیر با رگولاتور: مکانیسم رگولاتور تا اواسط سدهٔ نوزدهم به همان طرزی که وات انجام داده بود باقی ماند. در این تاریخ اصلاحاتی اساسی بوسیلهٔ نوآورانی مانند: فارکو (نخست) و کورلیس (بعداً) در آن وارد شد . زمانی تنظیم‌پذیری دتانت عملی شد (دراین‌باره بتفصیل سخن خواهیم گفت)، که تغییرات آن به فرمان رگولاتور قرار گرفت. در رگولاتور تغییرات مناسبی داده شد، بویژه لازم بود سرعت کار خیلی بیش از گذشته باشد تا تأثیر نیرومندتری به‌دست آید. این اصلاحات گوناگون بودند بخصوص از رگولاتور آرمینگتون نام می‌بریم که در میل‌لنگی با مقدار رفت تنظیم‌پذیر بود، کاری که برای این مشکل راه‌حلی عالی بود (شکل ۶). در نوع مشابهی، رگولاتور لنتس[2] هم جالب بود. اما خود اصل استفاده از نیروی مرکزگریزی برای ایجاد تأثیر متناسب با سرعت، هیچ‌گاه

1. Francke 2. Lentz



شکل ۴.نمای اجمالی یک رگولاتور مرکزگریز با بازوهای متقاطع.

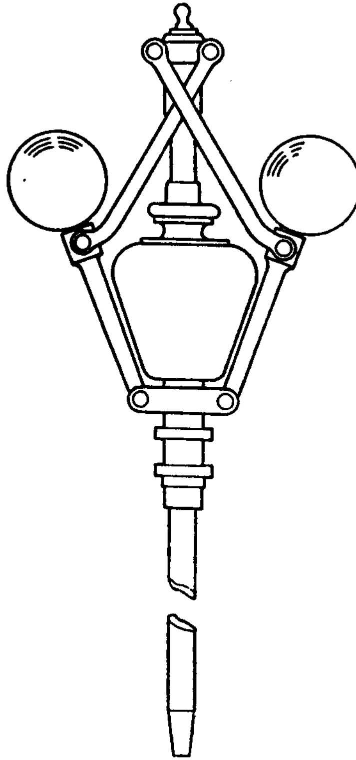
رها نشد.

سرووموتور: مکانیسم مهم سرووموتور را نمی‌توان نادیده انگاشت، زیرا بستگی نزدیکی با ساخت ماشین بخار و نیز کاربرد آن دارد.

نام فارکو در این مبحث بسیار تکرار می‌شود. باید گفت که در این مورد در برابر ما یک ماشین‌ساز فرانسوی ایستاده است که چه از نظر قدمت و چه از لحاظ شایستگی باید از پیشگامان این کار به‌شمار آید.

ما جز یادآوری پایه‌گذار آن، آقای ماری ـ ژوزف (۱۷۹۸ ـ ۱۸۷۵)، که از سال ۱۸۲۳ با پول خود این کار را شروع کرد سخن دیگری نداریم. وی نخستین کسی در جهان بود که مکانیسم دتانت تنظیم‌پذیر بوسیلهٔ رگولاتور را در سال ۱۸۳۶ به ثبت رسانید. دربارهٔ کشوی دتانت که مدال طلا را در سال ۱۸۴۴ برای وی تأمین کرد باید گفت که این کشو از حدود نیم سده پیش از آن در همه‌جا رواج داشت.

ژوزف فارکو (۱۸۲۴ ـ ۱۹۰۸) شریک اصلی پدر خود بود، سپس در سال ۱۸۵۳ سرمهندس کارخانه شد. کار اصلی وی را می‌توان آماده کردن موتور دانست که بخاطر آن در سال ۱۸۷۶ از

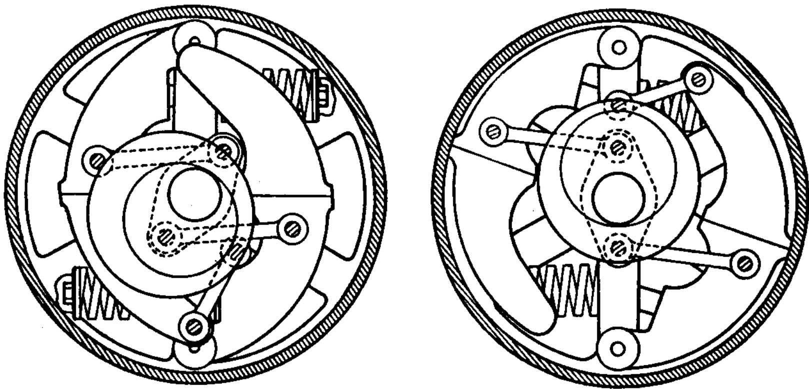


شکل ۵.رگولاتور مرکزگریز با وزنه‌های تعادل و بازوهای متقاطع.

آکادمی علوم فرانسه جایزهٔ پلومی[1] دریافت داشت.

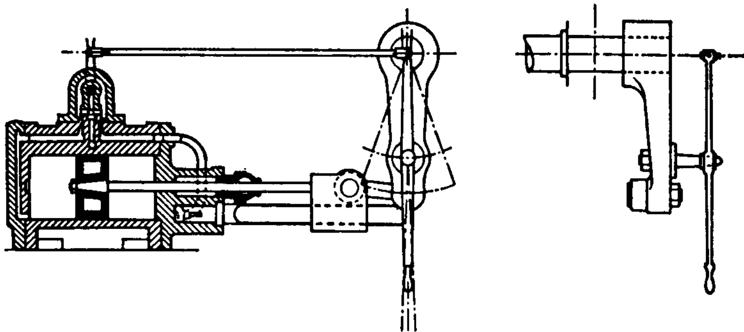
این سیستم در سال ۱۸۶۸ به‌کار افتاد اما آقای فارکو از طریق نوشته‌ای که در سال ۱۸۷۳ انتشار یافت از این جریان آگاه شد. اندیشهٔ اساسی آن، همان‌طورکه معلوم است، به‌کارگذاشتن یک موتور در وسیلهٔ فرمان است تا نیروی لازم برای اجرای یک مانور را به‌دست آورد. فرمان دقیقاً شبیه فرمان دستی بود، یعنی چیزی که با دست راننده می‌گردید و فرمان آن را انتقال می‌داد. در آرایش اولیه، با جابه‌جایی مناسب کشویی که بخار را در یک سیلندر موتور توزیع می‌کرد، نتیجهٔ این ابتکار به دست آمد (شکل ۷).

1. Plumey



شکل ۶.رگولاتور آرمینگتون: سمت چپ، متوقف؛ سمت راست، در حرکت.

فرمانهای بخاری: سروموتور اصولاً بمنظور مکانیکی کردن فرمان ناوهای عمده ساخته شد. بنابراین، آرایش آن به‌طوری بود که دوران دستگاه چرخ و طناب را عملی سازد، تا آنکه زنجیرهای هادی سکان دور قرقره پیچیده شوند. بوسیله چرخ دسته‌دار، که در گذشته به‌کار می‌رفت و با بازوی سکاندار می‌گردید، برای اینکه میله از یک پهلو به دیگری بگردد چندین دقیقه لازم بود. با وجود



شکل ۷.سروموتور بخاری فارکو.
سمت چپ: مقطعی که پیستون موتور را نشان می‌دهد.
سمت راست: نیمرخ محور موتور که حامل اهرم فرمان است.

سکان بخاری تنها یک نفر می‌توانست این کار را در چند ثانیه انجام دهد. اما چرخ دسته‌دار رایج، چنانکه گویی سروموتور وجود ندارد، به‌کار خود ادامه داد، به‌طوری‌که آنهایی که از سکانهای بخاری جدید استفاده می‌کردند به کارآموزی آن هیچ نیازی نداشتند. پیشرفتهای خودکار شدن بر پایهٔ سیستم به خدمتگیری کاربرد عمومی آغاز شد. این کار به‌شکل الکتریکی یا هیدرولیکی، نه با بخار، انجام گرفت؛ اما در مکانیزمی که فارکو یافته بود، که گویا جنبهٔ قطعی داشت، هیچ چیز اساسی تغییر نیافته بود.

ماشینهای تندکار

تعریف: آیا ماشینهای تندکار، ساختار یا طرزکار جدیدی دارند؟ بررسی آنها نشان می‌دهد که با ساختار جدیدی روبه‌رو هستیم. ماشینهای تندکار از یک‌سوی در واقع از همه روشهای اساسی طرزکار معمول استفاده کرده‌اند: ماشینهای یکطرفه، دو طرفه، بدون دتانت، یک انبساطی، چند انبساطی؛ ازسوی‌دیگر باید گفت که ماشینهای تندکار همیشه ساختاری مناسب کار خود داشته‌اند. در ماشینهای کلاسیکی افقی یا عمودی، نسبتها تغییر کرده‌اند: کاهش طول رفت نسبت به گشادی لوله، افزایش سطح بلشتکها، حالت جمع‌وجوری ماشین. در موارد دیگر، ساختارهایی دیده می‌شود که گرچه کاملاً جدید نیستند، لااقل آثاری از طرحهای جدید در آنها وجود دارد: روغندان سربسته، راندن قطعات در روغن، روغنکاری با فشار. تعدد سیلندرها و آرایش ردیفی، مقابل، یا حتی مثلثی آنها. همهٔ این خصوصیات ما را ناگزیر می‌سازد که به این ماشینها به چشم ماشینهایی با ساختار جدید بنگریم که بمنظور ایجاد سرعتهای زیاد ساخته شده‌اند.

اما ببینیم که تندکاری چیست؟ تعریفهای دقیقی از آن در دست است. منظورگروهی از ماشینها هستند که طی حدود نیم سده، از ۱۸۶۰ تا ۱۹۱۰ اهمیت یافتند. ما این موضوع را کمی بعد توضیح خواهیم داد. طی این مدت هر ماشینی که در دقیقه ۲۰۰ دور یا بیشتر می‌گردید تندکار نامیده می‌شد.

دیده می‌شود که در این تعریف سرعت زاویه‌ای، نه سرعت خطی پیستون، در نظرگرفته شده است. در ماشینهای بزرگ موجود در اواخر سدهٔ نوزدهم با طول رفت در حدود ۱٫۵ تا ۲ متر، و سرعت دوران ۶۰ تا ۸۰ دور در دقیقه، و سرعت پیستون آنها حدود چهار متر در ثانیه بود. پیستون در اکثر ماشینهای تندکار، تا این اندازه سریع جابه‌جا نمی‌شد. با این‌حال، ماشینهای بزرگ را هیچ‌گاه تندکار نگفته‌اند. این نامگذاری در واقع مخصوص ماشینهایی است که افزایش سرعت گردش آنها

همچون وسیله‌ای برای افزایش قدرت آنها، بدون افزایش وزن به‌کار گرفته شده است.

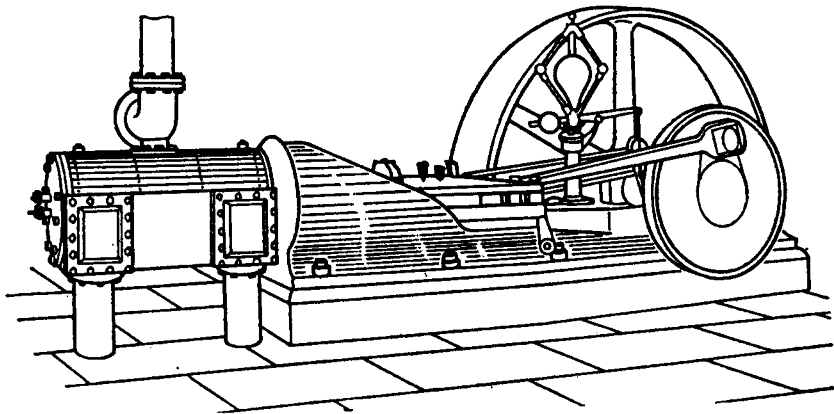
پیشگامان لوکوموتیو: پیشگامان تاریخی ماشینهای تندکار، آن‌طور که بر اساس چند رقم نتیجه می‌شود، لوکوموتیوها بوده‌اند. در سال ۱۸۲۹ لوکوموتیو راکت آقای استیونسن، در حداکثر سرعت خود که ۵۶ کیلومتر در ساعت بود، در مسابقه رینهیل به‌طور متوسط ۲۰۹ دور در دقیقه می‌گشت و سرعت پیستون آن ۲٫۸۵ متر در ثانیه بود. حدود سال ۱۸۴۶ لوکوموتیو گریت وسترن گوچ برای راه عریض و لوکوموتیو لیورپول ازکرامپتن برای راه معمولی، سرعتی برابر ۲۷۵ دور در دقیقه داشتند که سرعت رفت پیستون آنها ۵٫۵۰ متر در ثانیه و حدود ۱۲۵ کیلومتر در ساعت بود. بدیهی است که این سرعت در مسابقه بود. اما لوکوموتیوهای کرامپتن فرانسه که در سال ۱۸۴۹ به خدمت گمارده شدند ۲۰۰ دور در دقیقه یا ۸۰ کیلومتر در ساعت، و ۲۵۰ دور در دقیقه یا ۱۰۰ کیلومتر در ساعت سرعت داشتند؛ سرعت پیستون آنها به ترتیب ۴ و ۴٫۶ متر در ثانیه بود. درکار عادی روزمره بسرعتی کمتر از اینها هم خشنود بودند. با این‌همه، تردیدی نیست که سرعت زیاد برای نخستین بار با لوکوموتیوها به میدان آمد.

نخستین ماشینهای رفت‌وبرگشتی (دوطرفه)

ماشینهای ثابت اولیه و تندکاری که وارد بازار شدند از نوع امریکایی بودند. در سال ۱۸۶۲ در نمایشگاه لندن ماشین بخار پورتر ـ آلن ارائه شد. این یک ماشین افقی رفت‌وبرگشتی بود با بدنه‌ای قوطی‌شکل و سیلندری پیشامده و معلق. توزیع بخار با چهارکشوی ساخت پیوس فینک[1] انجام می‌گرفت که لنگی که تنها وصل به دریچهٔ ورود بخار بود بدان فرمان می‌داد. رگولاتور دارای وزنه‌های تعادلی آن، در ۱۸۵۸ طرح شده بود. این ماشین بخار پورتر ـ آلن مدتها با استقبال روبه‌رو می‌شد (شکل ۸). حدود سال ۱۸۸۵ انواع آن را تا حد ۲۰۰۰ اسب ساختند. اما تنها ماشینهای ۱۵۰ اسب و کمتر می‌توانستند ۲۰۰ دور یا بیشتر بگردند. کوچکترین مدل آن، ۲۵ اسب قدرت داشت و به‌طور عادی ۳۰۰ دور می‌گردید. اما مالکان آن برای افزودن قدرت آن دورش را تا ۶۰۰ بالا می‌بردند و این کار ماشین را خسته نمی‌کرد. موفقیت ماشین پورتر ـ آلن همچنان‌که انتظار می‌رفت، سبب شد که تقلیدکنندگان متعددی به ساخت ماشینهای افقی رفت‌وبرگشتی همت گمارند.

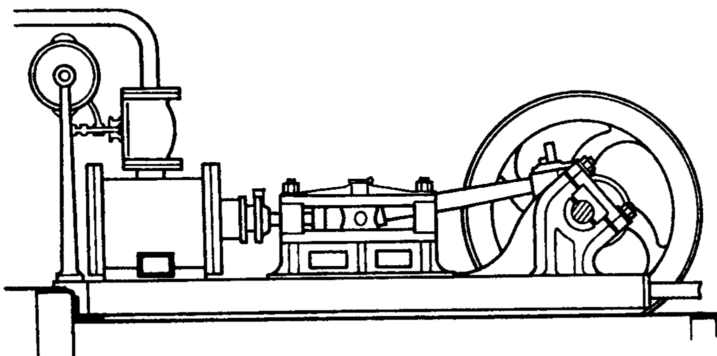
برای اینکه منصف باشیم باید از ماشینهای تندکار فرانسوی معاصر ماشینهای پورتر ـ آلن نیز سخنی گفته باشیم. این ماشینها ظاهراً بدون ارتباط با ماشینهای پورتر ـ آلن ساخته شدند؛ تاریخ ساخت آنها این ادعا را ثابت می‌کند. همچنین باید از ماشینهای افقی

1. Pius Finck



شکل ۸.ماشین بخار تندکار پورتر ـ آلن.

رفت‌وبرگشتی نیز یادی کنیم. آقای فلود ماشین‌ساز پاریسی، آنها را همچون ماشینهای ثابت و مانند لوکوموبیل ساخت (شکل ۹). مدل دارای ۶ اسب قدرت آنها در هر دقیقه ۲۵۰ دور می‌گردید و دتانت ثابت آن ۱/۴ بود (ورودی ۷۵٪). از این ماشینها در سالهای ۱۸۶۱ ـ ۱۸۶۲ نام رفته است. به‌وجود مدلی که در هر دقیقه ۵۰۰ دور می‌گردید اشاره رفته و تصریح شده است که آقای لنوار نوع این ماشین را برای موتور گازی خود انتخاب کرد که در همین زمان ساخته بود. با این‌حال، سرعت معمولی موتور لنوار آن‌طور که در آزمایشهایی که در سال ۱۸۶۱ آقای ترسکا روی آن انجام داد بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ دور در دقیقه



شکل ۹.ماشین بخار تندکار فلود.

بود. پس از سال ۱۸۷۰ نام فلود فراموش شد و تنها از ماشین امریکایی پورتر ـ آلن اسم برده می‌شد.

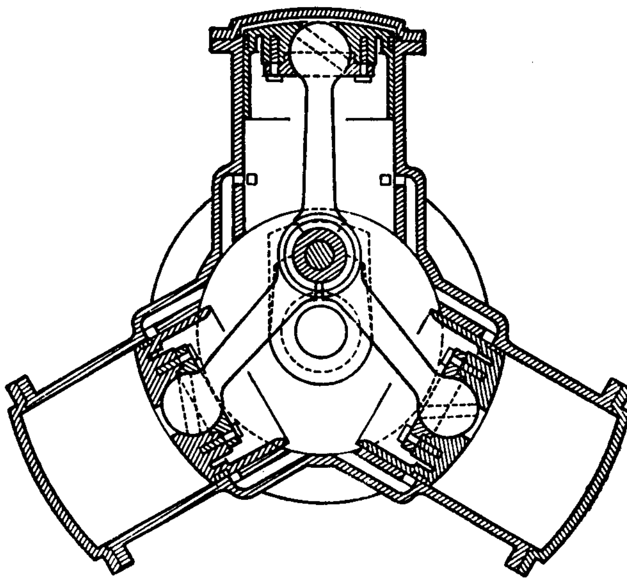
در همین زمان ماشینهای تندکار دوطرفه (رفت‌وبرگشتی) عمودی هم ساخته می‌شدند. می‌توان از ماشین مؤسسه Prager Maschinenbau A.G که آن نیز حدود سال ۱۸۸۵ ساخته شده است به مناسبت مکانیزم جالبش نام برد. بدنهٔ این ماشین دارای مجرایی پر از روغن بود که قطعات متحرک در هر حرکت نزولی در روغن غوطه می‌خوردند.

بازگشت به ماشین یکطرفه: اما دوران ۱۸۷۰ ـ ۱۸۹۰ دارای این تمایز است که ماشینهای تندکار دربرابر ماشینهایی که پس از وات فراموش شده بودند واپس نشستند. تنها استثناء این جریان، تلمبه‌های کورنوال است. در اینجا ما شاهد پیدایش مکانیزمی واقعاً بدیع و جالب هستیم. صرفنظر کردن از مکانیزم رفت‌وبرگشتی، ساخت سیلندرها را آسان ساخت. دیگر بخصوص به‌وجود غلافی جهت عبور دستهٔ پیستون (شاتون) نیازی نبود.

ماشین براذرهود[1] در سالهای ۱۸۷۱ ـ ۱۸۷۲ ساخته شد و طی ۱۵ سال توسعهٔ فراوانی یافت. این ماشین سه سیلندر یکطرفه با آرایشی مثلثی داشت، ـ چیزی که کاملاً جدید بود (شکل ۱۰). این ماشین بویژه برای قدرتهای ۱۰ تا ۱۵ اسب با سرعت معمولی ۵۰۰ تا ۶۰۰ دور در دقیقه می‌گردید. اما طرز کار آن حتی در ۲۰۰۰ دور نیز بسیار ثابت بود. ماشین براذرهود در واقع غولی بخارآشام بود: ۱۸ تا ۲۰ کیلوگرم در هر اسب در ساعت، که تقریباً سه کیلوگرم زغال می‌شود؛ درحالی‌که حجمی کوچک داشت. این ماشین با نحوهٔ کار دینامها ـ جز در بدو پیدایش آن ـ بخوبی سازگار بود. در زمانهای نخستین روشن‌سازی با برق، در واقع کمتر نگران صرفه‌جویی بودند. بدین‌ترتیب، ماشینهای براذرهود در هر جایی‌که منبعی از بخار وجود داشت رواج یافت: در کارخانه‌ها، کشتیها، خود لوکوموتیو. در سال ۱۸۸۵ حدود ۵۰۰ دستگاه از آن در فرانسه کار می‌کرد؛ قدرت آنها از ۳/۵ تا ۶۰ اسب بود و سرعت آنها به ترتیب از ۱۵۰۰ تا ۴۰۰ دور در دقیقه تغییر می‌کرد. طول رفت پیستون آنها همواره کمتر از قطر داخلی سلیندر بود؛ در ماشینهای دارای قدرت کم تقریباً با آن برابر، و در ماشینهای پرقدرت حدود دوسوم آن بود.

از ماشین براذرهود اقتباس زیادی شد. ازآن میان تنها از میان ماشین چارلز الجرنون پارسنز، سازندهٔ آتی توربین بخاری نام می‌بریم. می‌دانیم که این توربین بمنظور انجام دادن همان کاری ساخته شد که ماشین براذرهود انجام می‌داد. ماشین پارسنز، سال ۱۸۸۴، چهار سیلندر، دو به دو متقابل داشت که مجموعاً یک علامت به‌علاوه (+) را تشکیل می‌دادند اما شاخه‌های آن در یک

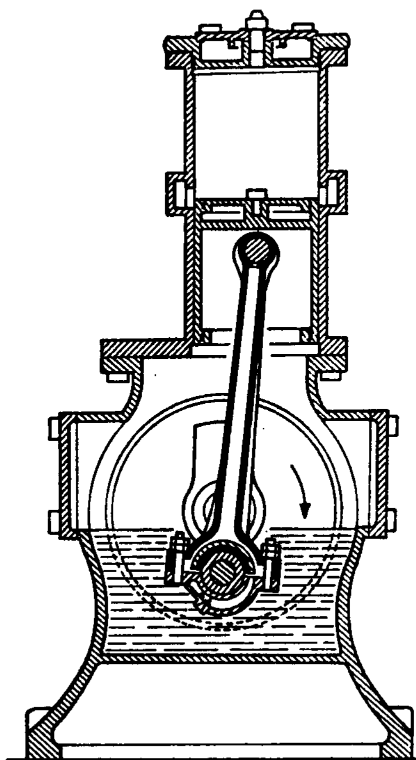
1. Brotherhood



شکل ۱۰ .ماشین تندکار برادرهود. مقطع عرضی از محور سیلندرها.

صفحه نبودند. دو پیستون متقابل را یک دستهٔ مشترک به‌هم مربوط می‌کرد و این شاتون مستقیماً یکی از دو زانویی لنگ را به‌کار می‌انداخت و دسته‌های لنگ حذف شده بودند. این امر سبب می‌شد که گروه چهار سیلندری، حرکتی دورانی با سرعتی برابر نیمی از سرعت محور دستگاه داشته باشد. بدین‌ترتیب، ما در اینجا با یک موتور با آرایش ستاره‌ای و گردان سیلندرها روبه‌رو می‌شویم، گرچه با موتورهای آتی هواپیمایی از همین نوع، که به موتورهای گردان ستاره‌ای اصطلاح شده‌اند تفاوتهای زیادی دارند. باید تأکید کرد که این ماشین پارسنز رواجی نیافت.

ماشین تندکار و یکطرفهٔ دیگری که با استقبال فراوان روبه‌رو شد ماشین وستینگهاوس است. این دستگاهی عمودی با دو سیلندر ردیفی، دارای کارتری سربسته در اطراف محور بود. قسمتهای متحرک آن در هر گردش وارد حمامی از آب می‌شدند که لایه‌ای از روغن همیشه روی آن بود (شکل ۱۱). قطر داخلی سیلندر این ماشین برابر طول رفت پیستون آن بود. کوچکترین مدل این ماشین چهار اسب قدرت داشت و ۵۰۰ دور در دقیقه می‌گردید، درحالی‌که بزرگترین آن ۱۱۰ اسب قدرت داشت و در هر دقیقه ۲۸۰ دور می‌گردید. یک ماشین ۷۵ اسبی آن دارای ابعاد



شکل ۱۱.ماشین تندکار وستینگهاوس. مقطع عرضی، کارتر مسدود، حمام روغن.

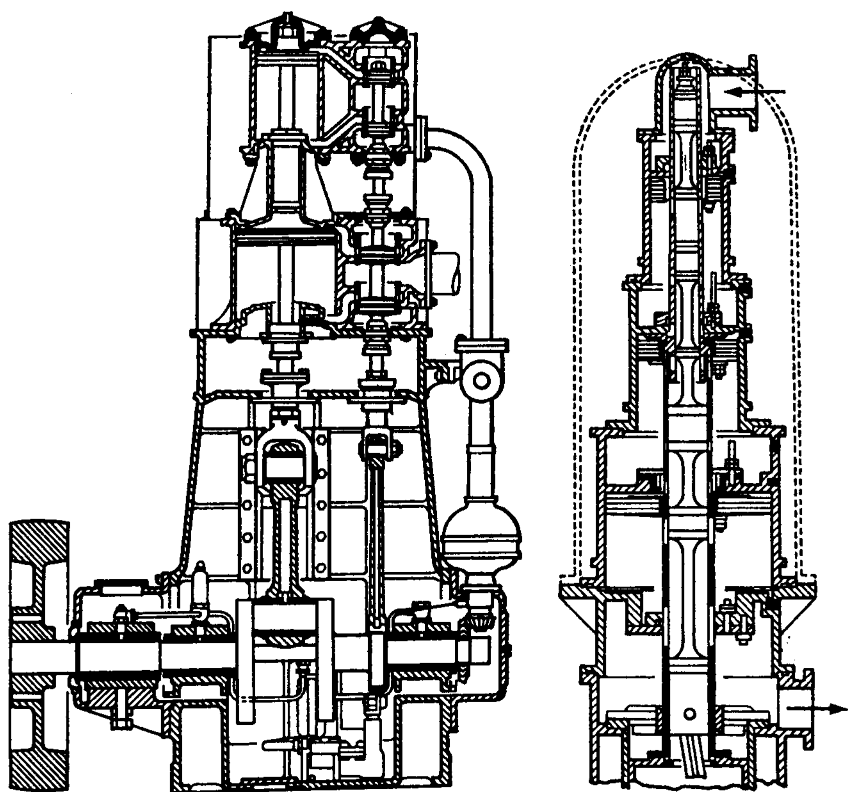
۲٫۲۰ × ۱٫۴۰ متر با دو متر ارتفاع بود و ۳٫۵ تن وزن داشت. ماشین وستینگهاوس بخصوص برای روشنایی برقی کشتیها مناسب بود و به همین علت آن را با قدرت زیاد برای کشتیهای مسافربری یا پستی می‌ساختند. این ماشین در سال ۱۸۸۵ در ممالک متحدهٔ امریکا رواج تمام داشت، اما در اروپا زیاد شناخته شده نبود. بعدها در همه‌جا به‌کارگرفته شد و اقتباسهای فراوانی از آن به‌عمل آمد. استحکام آن شگفت‌انگیز بود، آقای امه ویتز در سال ۱۹۱۳ نوشته است که: «یک ماشین ۷ اسبی آن‌که در هر دقیقه ۷۰۰ دور می‌زند، بدون اینکه از مه دریا در پناه باشد پنج ماه تمام کار می‌کند. این ماشین را قشر ضخیمی از نمک پوشانیده است و با این‌همه روز و شب، تنها با سه وقفهٔ ربع ساعتی کار می‌کند.»

تأثیر ماشینهای یک‌مرحله‌ای بر نخستین موتورهای انفجاری: در اینجا باید دربارهٔ خویشاوندی دو نوع ماشین تندکاری که شرح آنها داده شد و انواعی از موتورهای انفجاری بسیار مشهور تأکید کنیم. ماشین وستینگهاوس مکانیزمی دارد که بوضوح الهامبخش موتور دایملر، خاستگاه همهٔ تحولات اتومبیل‌سازی است. نکته‌یابی برای ثبات این ادعا زاید است تنها کافی است که مقطع دو ماشین را برابر هم بگذاریم تا معلوم شود که مدل هر دو یکی است (شکلهای ۱۲ و ۱۳).

در مورد ماشین براذرهود باید گفت که موتور مثلثی هواپیما را تداعی می‌کند. این شباهت آن‌قدر آشکار است که لزومی به اصرار برای اثبات آن نیست؛ گرچه برخی جزئیات با یکدیگر متفاوتند. آقای شارل رنار بخاطر آزمایشهای موفق در مورد بالونهای دیریژابل (قابل هدایت) که در سالهای ۱۸۸۴ ـ ۱۸۸۵ انجام داده است بسیار سرشناس است. موتوری که در آن زمان به‌کار می‌برد برقی بود. آقای رنار که در سال ۱۹۰۵ مرد گرچه طی بیست سال آخر عمر خود صعودی نکرد لیکن وقت خود را وقف پژوهش دربارهٔ موتور سبک کرده بود. با این‌حال، وی کوشش خود را روی بخار متمرکز ساخته بود. او می‌خواست موتوری با وزن پنج کیلوگرم در هر اسب بسازد که دو اسب آن به دیگ بخار و سه اسب به موتور مربوط می‌شد. در پنجمین نمایشگاه بین‌المللی فضانوردی در پاریس به سال ۱۹۱۳ یکی از کارهای گذشته او ارائه شد. در این تاریخ موتور ستاره‌ای با سوخت بنزین، حاصل زحمات پیر برتل[1] و برادران سگن (لویی و لوران) بود، که با عنوان موتور گنوم $Gnome$ معروف شد و کاملاً بدیع بود. این امر توجه سازندگان را به پیش‌نمونه‌های رنار جلب کرد. همه این موتورها از نوع براذرهود، اما به‌جای سه، دارای شش یا هشت سیلندر بودند که به حالت ستاره‌ای ثابت، یگانه یا دوگانه بودند، دربارهٔ قدمت آن باید گفت که غالباً از فلیکس میله نقل می‌کنند که در سال ۱۸۸۷ سه چرخها و موتورسیکلتهای بنزینی ساخته شد که موتور آنها گردان و با آرایش ستاره‌ای بود و در یکی از چرخها جاسازی می‌شد. چنین می‌نماید که این وسایل در پیشرفت به‌سوی موتور گنوم، هیچ نقشی نداشتند. احتمال می‌رود که خود آقای میله از ماشینهای براذرهود الهام گرفته است.

برای اینکه دربارهٔ ماشینهای تندکار یکطرفه سخن را تمام کنیم باید چند کلمه‌ای هم از ماشین ویلنس[2] در امتیازنامهٔ نخستین اختراعش در سال ۱۸۸۴ سخن بگوییم. این نوعی ماشین عمودی با سه انبساط بود که روی هر دستهٔ پیستون آن سه سیلندر روی‌هم قرار داشتند (شکل ۱۲). هر ماشین به‌طورکلی دارای دو یا سه گروه از این نوع بود که روی یک محور ردیف شده بودند. دسته‌های پیستونها که توخالی و سوراخدار بودند قسمت توزیع بخار را تشکیل می‌دادند. هر دستهٔ

1. P. Berthel 2. Willans



شکل ۱۲.ماشین ویلنس با انبساط سه‌گانه: بخار از راه غلافی که تشکیل شاتون پیستونها را داده است از یک سیلندر به سیلندر دیگر سرازیر می‌شود. قطعاتی که به شکل T جفتی هستند کشوهای استوانه‌ای هستند که در این شاتون رفت‌وآمد دارند.

شکل ۱۳.ماشین تندکار بلیس که دلونه ـ بل‌ویل آن را ساخته است. ماشین دو انبساطی، دوطرفه، که توزیع بخار در آن بوسیلهٔ کشوهای استوانه‌ای صورت می‌گیرد.

پیستون دارای یک ردیف کشوهای استوانه‌ای بود که یک مکانیسم مشترک، که خود بوسیلهٔ یک صفحهٔ بادامکی مستقر بر یاتاقانگرد میل‌لنگ فعال می‌شد، آنها را حرکت می‌داد. سیلندر دارای فشار زیاد بالاتر از همه بود، زیر پیستونی مخزن میانی بخار بود و بالاخره در زیر آن سیلندر کم فشار قرار داشت. مخزن میانی آخری بین سیلندر کم فشار و کندانسور گذاشته شده بود، تا ارتباط بین این دو ظرف به‌هیچ‌وجه مستقیم نباشد. با ۱۵ کیلوگرم بخار مقدار ۶ یا ۶٫۵ کیلوگرم برای هر

اسب در ساعت سوخت مصرف می‌شد، که برای یک ماشین تندکار نتیجهٔ خوبی بود. از ماشین ویلنس در مراکز تولید نیروی برق، زیاد استفاده می‌شد. آن را برای قدرتهای از ۴۰ تا ۲۴۰۰ اسب می‌ساختند که قدرت جالبی بود. کوچکترین این ماشین ۷۰۰ و بزرگترین آن ۲۰۰ دور در دقیقه می‌گردید که آن‌هم دستاورد خوبی بود اما دیگر از ماشین پورتر ـ آلن ـ ۲۰۰ دور در دقیقه و قدرت ۱۵۰ اسب ـ دور شده بودیم. ماشین ویلنس را می‌توان در ردیف نخست ماشینهای تندکار سالهای ۱۸۹۰ ـ ۱۸۹۵ قرار داد.

بازگشت به ماشینهای دوطرفه: در سال ۱۸۹۰ گرایش به ساخت ماشینهای دو طرفه، دیده می‌شود. نشانهٔ آن ثبت اختراع آقای بلیس[1] ماشین‌ساز در انگلستان است. اجازهٔ ساخت این ماشین در فرانسه را در سال ۱۸۹۷ آقای دلونه ـ بل‌ویل[2] به‌دست آورد. این ماشین که تندکار و دو طرفه بود در جریان ساخت، با دشواریهایی روبه‌رو شد که تنها بتدریج و با کمک تجربیاتی که در ساخت ماشینهای یکطرفه به‌دست آورده بودند، رفع شدند. آقای بلیس از سیلندرهای روی هم قرار گرفته استفاده می‌کرد (شکل ۱۳). گروه ماشینهای ۱۸۰۰ اسب که آقای دلونه ـ بل‌ویل در نمایشگاه سال ۱۹۰۰ به نمایش گذاشت دارای سه انبساط با چهار سیلندر در دو ردیف بود: یکی پرفشار ـ کم‌فشار (HP-BP) و دیگری میان فشار ـ کم‌فشار (MP-BP). سرعت این ماشینها ۲۵۰ دور در دقیقه بود. مهمترین نوآوری که در ماشین بلیس دیده می‌شود وجود سیستم روغنکاری فشاری بوسیله تلمبه‌هایی است که روغن را از مجراهایی که در محور قطعات ایجاد شده بودند به داخل همه مفاصل می‌رسانیدند. یک بازده ۹۲٪ برای یک ماشین ۳۰۰ اسب ثبت شده است. یادآور می‌شویم که این رقم، نسبت قدرت ارزیابی شده است، یعنی از کار بخار روی پیستون، و قدرت حقیقی، که با مهار محور ماشین تعیین می‌شود به‌دست می‌آید. مؤسسه فرانسوی دیگری به نام بولت ـ لاربودیر[3] با الهام از بلیس، به ساخت نوعی ماشین تندکار دست زد. اما این ماشین ـ با داشتن نوعی تلمبهٔ روغنی جدید، بسیار ساده و کارآمد، بدون شیر، با سیلندری نوساندار و پیستونی که یک مکانیزم لنگ آن را مستقیماً می‌کشید ـ شهرتی به‌هم رسانید. نمونهٔ ۱۵۰ اسبی آن که ۹۰۰ دور می‌زند تنها ۶۰۰ کیلوگرم، یعنی برای هر اسب، چهار کیلوگرم وزن داشت (دیگ بخار به حساب نیامده است).

اما ماشینهای تندکار بخار آینده‌ای نداشتند. گسترهٔ واقعی کاربرد آن در نیروگاههای کوچکی بود که برای روشنایی، بدون در نظر گرفتن هزینه، تأسیس می‌شدند. این نوع مؤسسات مدت زیادی نپاییدند. طولی نکشید که تکثیر نیروگاههای بزرگ، کاربرد ماشینهای تندکار را محدود ساخت. این

1. Bellis 2. Delaunay-Belleville 3. Boulte-Larbodieŕe

نیروگاهها گرفتار رقابت پیروزمندانهٔ توربینها برای قدرتها زیاد، موتورهای برق و موتورهای درونسوز برای قدرتهای کمتر شدند.

حدود سال ۱۹۱۴، ماشینهای تندکار آشکارا در سراشیب زوال بودند. هیچ‌گاه نتوانستند هزینهٔ آن را تا آن اندازه پایین آورند تا ادامهٔ کار آن ممکن باشد. با این‌همه معتقدیم که نقش تاریخی جالبی داشته است زیرا محققاً راه ساخت موتورهای انفجاری را گشوده است. چنانچه این ماشینهای محکم و تندکار که با وظایف دیگری هم می‌شد آنها را سازگارکرد وجود نداشتند موتورهای انفجاری طی سی‌سال پایانی سدهٔ نوزدهم بدین سرعت پیشرفت نمی‌کردند.

لوکوموتیوها

آقای آندره شاپلون در سال ۱۹۳۸ دربارهٔ لوکوموتیوها قضاوت درستی کرده است. وی گفته است: «استقبال شگفت‌انگیزی که لوکوموتیو از ابتدای اختراع با آن روبه‌رو شد، در تاریخ تکنیک پدیده‌ای بسیار خاص و حتی استثنایی است. این صنعت چه از لحاظ اصول کارکرد و چه از نظر شکل تکامل پیوستهٔ عجیبی داشته است.» این داوری در زمانی بیان شده است که لوکوموتیو بخاری تقریباً به پایان تاریخ خود رسیده است. با اینکه لوکوموتیوهای بخاری پس از گذشت ۳۵ سال از ۱۹۳۸ هنوز به‌کار خود ادامه می‌دهند، در واقع باید پذیرفت که با آغاز جنگ جهانی دوم دورهٔ نوآوری آنها به پایان رسیده بود.

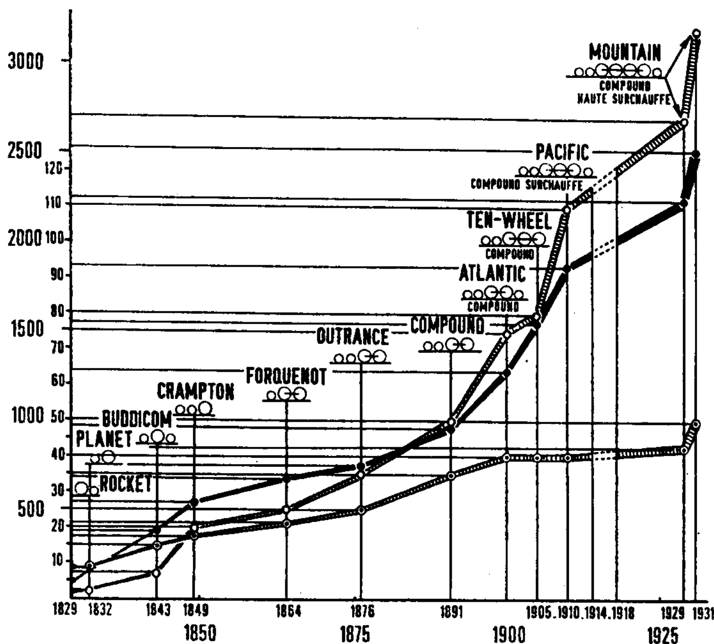
خصوصیات کلی تحول آنها: روشن است که بالا رفتن پیوسته قدرت واحدها تعیین‌کنندهٔ نوع تحول لوکوموتیوهای بخاری است. این بالا رفتن قدرت، مستلزم زیاد شدن ابعاد، یعنی وزن و نیز زیاد شدن فشار کاری دیگ بخار است؛ عامل اخیر باعث افزایش توان جرمی، یعنی تعداد اسب بخار در هر تن جرم ماشین است.

می‌توان همه اینها را با ارقام مشخص کرد. نمونه‌هایی که در زیر می‌آیند، تنها مربوط به لوکوموتیوهای تندکار می‌شوند، نمونه‌های جالبی هستند زیرا همهٔ محدودیتها در اینجا جدیتر از لوکوموتیوهای باری است و آقای شاپلون قدرت لوکوموتیو راکت استیونسن در سال ۱۸۲۹ را ۲۵ اسب تخمین می‌زند. این لوکوموتیو برای وزن ۴٫۲۵ تنی و فشار ۳٫۵ اتمسفری است. بلافاصله پس از آن، ماشین پلانت از همان سازنده به بازار آمد و برای نخستین بار لوکوموتیوهایی ساخته شدند که در تمام تاریخ لوکوموتیوسازی بدون تغییر باقی ماندند. آقای ژاک آرمنگو در سال ۱۸۶۲ چنین نوشته است: «این نوع لوکوموتیو به‌نظر ما نقطه شروع واقعی ساخت لوکوموتیوهای جدید

است که می‌توان گفت تمام اسکلت‌بندی را، بجز دستکاریهای جزئی و اصلاحات متعددی که برای افزایش قدرت و تنوع کاربرد سیستمهای تازه وارد شده‌اند داراست.» این سخنان که سی‌سال پس از پیدایش نوع پلانت نوشته شده‌اند امروز هم ارزش خود را از دست نداده‌اند. وزن این ماشین به هشت تن و قدرت آن به ۵۰ اسب رسیده بود، اما فشار کاری دیگ بخار همان است که بود. آقای شاپلون قدرت لوکوموتیو بودیکوم[1] را که از سال ۱۸۴۳ در خط پاریس ـ روان حرکت می‌کرد، ۱۵۰ اسب تخمین زده است. وزن این لوکوموتیو به ۱۹ تن و فشارکاری دیگ بخار به شش اتمسفر رسید. شش سال پس از آن، لوکوموتیوهای پر آوازهٔ کرامپتن[2] ساخته شدند که نخست در خط پاریس ـ لیل حرکت می‌کردند. این ماشین بدون اینکه فشار زیادی احساس کند ۱۰۰ کیلومتر در ساعت سرعت داشت؛ قدرت آن ۵۰۰ اسب، وزن ۳۴ تن و فشار کاری دیگ آن ۷ اتمسفر بود. طی ۲۰ سال پیشرفت در لوکوموتیوسازی شگفت‌انگیز بود. این دوره‌ای افسانه‌ای است. نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم، تنها صرف تحکیم دستاوردهای پیشین شد (شکل ۱۴). در سال ۱۸۶۴ ما با لوکوموتیو فورکنو[3] برمی‌خوریم که ۵۰۰ اسب توان و ۳۴ تن وزن داشت. فشارکاری دیگ این لوکوموتیو ۵ و ۸ اتمسفر بود. در سال ۱۸۷۶ لوکوموتیو نوع اوترانس[4] به بازار آمد؛ قدرت آن ۷۰۰ اسب، وزن ۳۷/۵ و فشار کاری دیگ به ۱۰ اتمسفر رسید. تا این زمان در قسمت توان جرمی لوکوموتیو تحول چشمگیری ایجاد نشده بود، اما در سال ۱۸۸۰ وضع تغییر یافت. در حقیقت استفاده از دیگ بخار فولادی، مقدار فشار را به‌طور جهشی بالا برد. در سال ۱۸۹۱ مقدار فشار در لوکوموتیو معروف کومپوند[5] شرکت نور[6] معروف به DuBousquet-de-Glehn به ۱۴ اتمسفر رسید. وزن این لوکوموتیو ۴۸ تن و قدرت آن ۱۰۰۰ اسب بود.

از این تاریخی که بدان رسیده‌ایم به بعد، حدود ۴۰ سال، تحول در این رشته از نو سریع شد. یک ماشین آتلانتیک سال ۱۹۰۰ قدرتی برابر ۱۵۰۰ اسب و وزنی برابر ۶۴ تن داشت؛ فشار کاری دیگ آن ۱۶ اتمسفر بود. تا مدتی ازدیاد فشار بخار آهسته بود. در سال ۱۹۰۵ ما شاهد پیدایش لوکوموتیو تن ـ ویل[7] هستیم که نخستین نمونه ماشینهای تندکار با سه محور زوجی است. قدرت این لوکوموتیو ۱۶۰۰ اسب، و وزن آن ۷۷ تن بود؛ اما فشار کاری دیگ آن اضافه نشده بود. پنج سال بعد، در سال ۱۹۱۰ لوکوموتیو پاسیفیک ساخته شد که آیندهٔ درخشانی داشت؛ فشار کاری دیگ آن همیشه ۱۶ اتمسفر بود. قدرت این لوکوموتیو ۲۲۰۰ اسب بود ـ حدنصابی جالب ـ وزنش هم زیادتر، و به ۹۳ تن رسیده بود. متذکر می‌شویم که این نوع لوکوموتیو که در سال ۱۸۹۲ در

1. *Buddicom* 2. *Crampton* 3. *Forquenot* 4. *Utterance* 5. *Compound* 6. *Nord*
7. *Ten-Wheel*



شکل ۱۴.نمودار اجمالی تحولات لوکوموتیوهای بخاری از ۱۸۲۹ تا ۱۹۳۱ رقمهای درشت در محور عمودی قدرت رسمی را به اسب می‌دهند (منحنی بالایی هاشوردار). رقمهای ریز در محور عمودی وزن لوکوموتیوها با ظرفیت پر به تن می‌باشند (منحنی میانی با خط پر). منحنی هاشوردار پایینی فشارکاری دیگ را به کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌دهد. مقیاس فشارها با مقیاس وزن در رابطهٔ ۱٫۲۰۵ (۲۰ کیلوگرم برای ۵۰ یا ۱۶ کیلوگرم برای ۴۰ تن) متناسب است

ممالک متحده امریکا ساخته شده بود در سال ۱۹۰۰ در آن سرزمین رواج کامل داشت. اما تنها در سال ۱۹۰۷ بود که در فرانسه نخستین لوکوموتیو پاسیفیک به‌کار افتاد و سه سال پس از آن ۲۰۰ دستگاه از آن در خطوط فرانسه حرکت می‌کردند.

لوکوموتیوهای نوع ماونتین[1] مانند لوکوموتیوهای پاسیفیک تبار امریکایی داشتند. این نوع لوکوموتیو در سال ۱۹۱۲ در ممالک متحده امریکا ساخته شد، اما تا پایان جنگ جهانی نخست در اروپا مورد استفاده قرار نگرفت. کاربرد زیاد آن در سال ۱۹۲۵ در اسپانیا بود. در فرانسه در سال ۱۹۲۵ شرکتهای EST و PLM نمونه‌های اولیهٔ آن را وارد شبکه کردند. مدل سال ۱۹۲۹

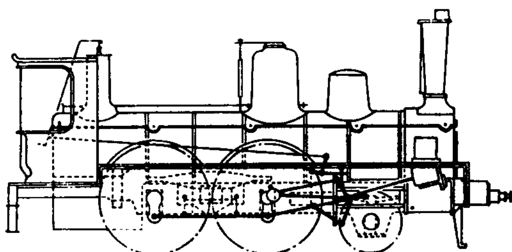
1. *Mountain*

آن دارای ۲۷۰۰ اسب قدرت و ۱۱۲ تن وزن بود درحالی‌که فشار کاری دیگ آن از لوکوموتیوهای پیش گفته شده کمی زیادتر، یعنی ۱۷ اتمسفر، بود. حدود سال ۱۹۳۰ یک رشته تغییر شکلهای سنجیده در مدلهای مورد استفاده در شبکه‌های بزرگ راه‌آهن وارد شد. در سال ۱۹۳۱ یک لوکوموتیو ماونتین با وزن ۱۲۵ تن اما با فشار کاری دیگ ۱۲۰ اتمسفر، قدرتی نزدیک به ۳۲۰۰ اسب داشت (شکل ۱۵).

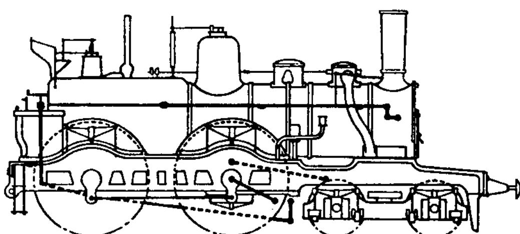
می‌توان با ارائه چند رقم مشخص‌کنندهٔ توان جرمی ـ قدرت بر وزن به تن ـ به شمارش این تحولات ادامه داد: ۵/۹ برای لوکوموتیوراکت در ۱۸۲۹؛ ۱۴/۸ برای کرامپتن در ۱۸۵۰؛ ۲۰/۸ برای کومپوند در سال ۱۸۹۱ و بالاخره ۲۵/۴ برای ماونتین در ۱۹۳۱.

محدودیتهای ویژه: از این بیشتر دربارهٔ لوکوموتیوهای بخاری سخن نمی‌گوییم. تنها یک نکتهٔ مهم را یادآور می‌شویم. همه می‌دانند که عرض معمولی ریلها از آنچه که در آغاز معین شده بود عملاً تغییری نیافت. بنابراین لوکوموتیوها تنها در دو جهت می‌توانستند بزرگ شوند: در طول، که افزایش اصلی در این جهت ایجاد می‌شد، در ارتفاع، که افزایش بُعد، گرچه به‌طور محدود، امکانات قابل توجهی برای بزرگ شدن مقطع دیگهای بخار، زمانی که جرأت این کار را یافتند، تأمین می‌کرد. در واقع تا مدتها بدون چون و چرا قبول داشتند که گرانیگاه ماشین باید تا حد امکان پایینتر باشد ـ عقیده‌ای که موجب شد دیگ بخار را در پایین، بین چرخهای متحرک قرار دهند، بنابراین، ابعاد آن شدیداً محدود می‌شد. وضع اکثر لوکوموتیوهای قدیمی چنین بود. اما مهندسان بزودی جسارت ورزیدند و ادعا کردند که بر خلاف پیش‌بینیها، بالا بردن گرانیگاه، هیچ اشکالی ایجاد نخواهد کرد. بدین‌ترتیب، بدنه‌های استوانه‌ای به نسبتهای زیادی افزایش یافتند. حدود سال ۱۹۰۷ بدنهٔ دیگ بخار در اروپا دارای ابعاد ۱/۵ تا ۱/۶ و در امریکا ۱/۸ تا ۱/۹ متر بود. در سال ۱۹۳۸ در اروپا ۱/۸ تا ۱/۹ و در امریکا ۲/۴ تا ۲/۶ متر بود. حتی گاهی هم، به‌علت گشاد شدن قالب در امریکا، از این‌هم بزرگتر می‌شد.

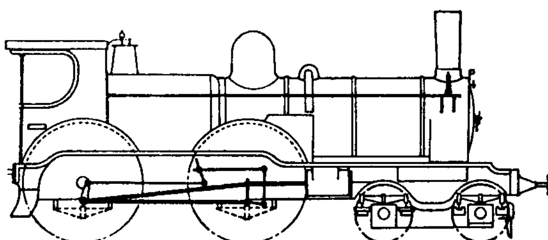
جنبه‌های گوناگون: دربارهٔ جنبه‌های خاصی از تحول لوکوموتیوها به‌عنوان ماشینهای بخار در صفحات آینده اطلاعاتی خواهیم یافت: توضیح خواهیم داد که چرا داغ کردن بخار در پوشهٔ بخاری روی این ماشینها ترجیح داده شد (صفحهٔ ۹۲). ما در جای خود منشأهای عمل پیشامدگی کشو و کاربرد پوشش لبه‌های محفظهٔ بخار را باز خواهیم نمود (صفحهٔ ۱۰۰). ما نقشی را که این ماشینها در یافتن مکانیسمهای ویژهٔ ایجاد تنظیم‌پذیری دتانت داشته‌اند خواهیم گفت؛ مکانیسمی که پیدایش وسیله‌ای را موجب شد که کاربرد بسیار گسترده‌ای یافت، مثل دریچهٔ کشویی استیونسن



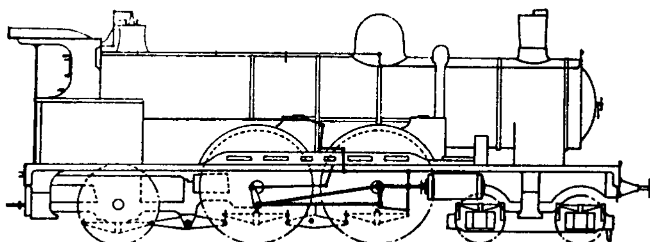
Forquenol, 1864



Utterance, 1876

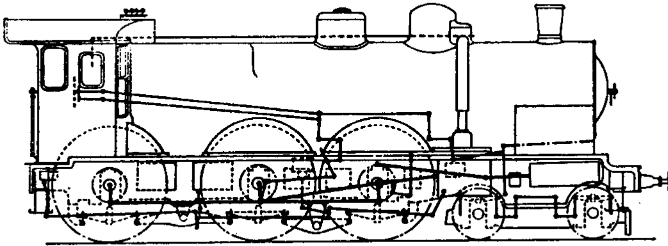


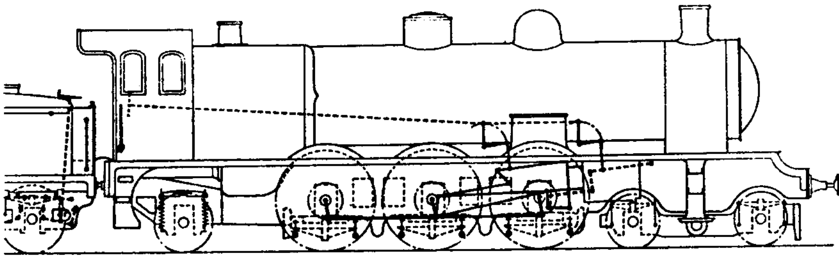
Compound, 1891

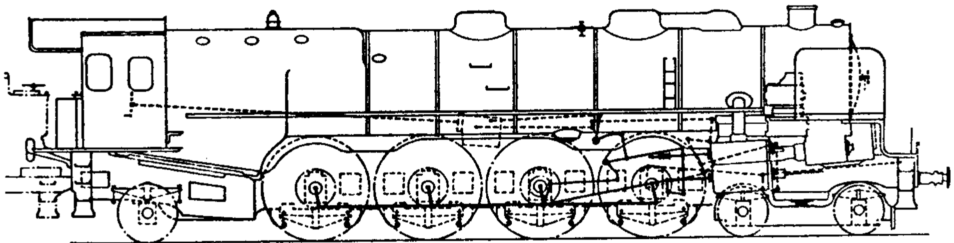


Atlantic, 1900

شکل ۱۵ .شکل اجمالی لوکوموتیوهایی که در نمودار پیش مشخصات آنها داده شده است. (۱۸۶۴ ـ ۱۹۳۱). همهٔ لوکوموتیوها با یک مقیاس رسم شده‌اند.







شکل ۱۵.ادامه

(صفحهٔ ۱۰۱). ما جای آنها را در لوکوموتیوهای ترکیبی، آنجا که تاریخ انبساط چندگانه را باز می‌نماییم، نشان خواهیم داد (صفحهٔ ۱۱۸)؛و از یادآوری پیش‌نمونه‌های دیگ بخار لوله دودی، قضیه‌ای که مورد نزاع است، غفلت نخواهیم ورزید (صفحهٔ۱۶۱).سرانجام متذکر می‌شویم که در بالا از لوکوموتیو به‌عنوان مقدمهٔ تاریخی ماشینهای تندکار یاد کرده‌ایم (صفحهٔ۴۹).

ماشین بخار کشتی

در مجلد دوم (صفحات ۴۶۰ تا ۴۶۶) دربارهٔ ماشین بخار کشتی مختصری گفته شد. برای اینکه تحول این ماشینها را تا به آخر نشان دهیم باید به این موضوع بازگردیم.

ماشینهای شاهنگی جانبی: دیده شد که قدیمیترین کشتیهای بخاری مانند وسایل چرخدار حمل‌ونقل مجهز به ماشینهای کم فشار بودند. تقریباً همهٔ این ماشینها مانند ماشینهای ثابت آن روزگار از نوع شاهنگی بودند، اما شاهنگ آنها در قسمت پایین وسیله قرار داشت تا گرانیگاه در پایین قرارگیرد و کشتی از ثبات خوبی برخوردار باشد. مکانیسم ماشینهای بخار شاهنگی در رابطه با ماشینهای استیونسن بتفصیل شرح داده شده است (رجوع کنید به مجلد سوم صفحات ۴۴۵ تا ۴۴۸). مشخصات اصلی آن را به‌خاطر آوریم: دو شاهنگ جانبی در دوسوی ماشین به‌طرف بیرون از آن قرار داشتند؛ دسته‌های آویزانی از یک بازوی متصل به شاتون، شاهنگها را هدایت می‌کردند. دستهٔ بزرگ از پایین به بالا عمل می‌کرد و ته آن روی پلی اهرم شده بود که سرهای شاهنگها روی آن قرار داشتند.

ماشین با شاهنگ پایین حدود نیم سده مورد توجه بود. این ماشین بسیار حجیم (گفته می‌شود تا ۲۴۰ کیلوگرم برای هر اسب)، وکارش بسیار آرام بود و قطعاتش بسیار مستحکم. زوال کشتیهای چرخدار کاملاً تدریجی بود. حدود سال ۱۸۸۵، چهل سال پس ازکاربرد پروانهٔ کشتی کشتی‌سازان هنوزگاهی چرخهای پره‌دار را برای مواقعی که کشش بسیار ضعیف آب لازم بود، به‌کار می‌بردند. از برخی کشتیهای بزرگ تجارتی نام برده شده است که از مانش گذشته‌اند، وکشتیهایی پستی ایرلندی که بین کینگستاون[1] و هالیهد[2] رفت‌وآمد داشتند و نیز کشتیهای توپدار فرانسوی که در رودخانه‌های تونکن خدمت می‌کردند.

ماشینهای دیگر کشتیهای چرخدار: همچنین انواع دیگری از ماشینهای بخار مخصوص کشتیهای چرخدار درکار بودند که در بعضی از آنها اتصال بلاواسطه‌ای وجود داشت، یعنی بمنظور کاستن از دست‌وپاگیری و وزن زیاد ماشین، قسمت شاهنگ حذف شده بود.

ماشینهای عمودی با شاتونهای مستقیم را آزمایش کردند. سیستمی که بسیار ساده بود اما طول کافی برای بازو را تحمل نمی‌کرد، عیبی که به آرامی کار آن لطمه می‌زد (رجوع کنید به شکل ۸۹ مجلد سوم، صفحهٔ ۴۶۵).

در ماشین بخار ناقوسی، وضع سیلندر تغییری نکرده است، اما اشکال در جهت دیگری منحرف شده است: شاتون حامل مثلثی است که لنگ محور چرخها را احاطه کرده است؛ ته باز و به نوک

1. Kingstown 2. Holyhead

این مثلث اهرم شده و سر بازو به لنگ اتصال یافته است.

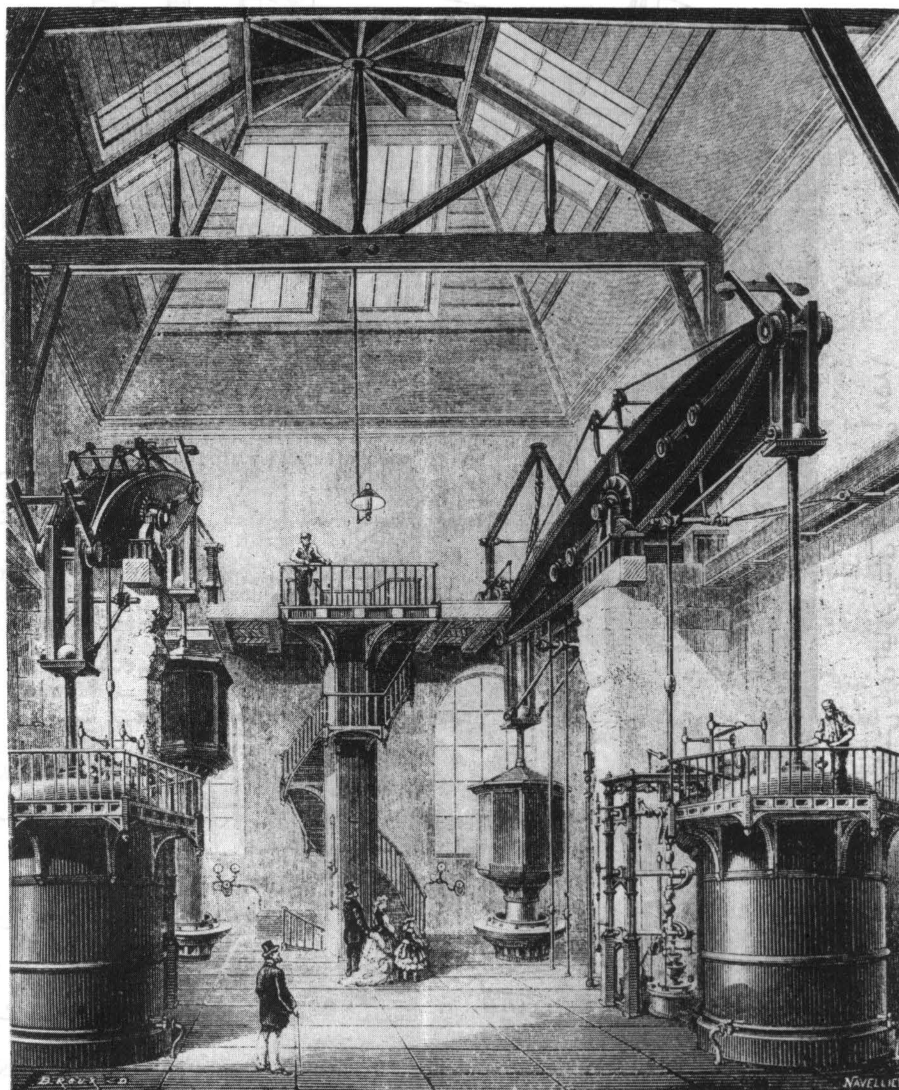
بعداً ماشینهای جناغی ساخته شدند که دو سیلندر به‌شکل ۸ بسیار باز داشتند. این حالت بسیار مناسب و تا مدتها متداول بود. بیشتر ماشینهای رونتگن که پیشاهنگ هلندی ماشینهای دو انبساطی ـ که بعدها دربارهٔ آنها سخن خواهیم گفت ـ بود از نوع ماشینهای جناغی بودند.

اما ماشین بخاری که بیشترین موفقیت را داشت، از نوع نوساندار بود. ماشینهای نوساندار که به‌شکل ماشینهای ثابت وارد بازار شدند با ابتکار جان‌پن، یکی از سرشناسترین ماشین‌سازان انگلیس، در کشتیهای بزرگ کارگذارده شدند. چون بازو در این ماشین حذف شده بود سیلندر به‌آسانی در زیر محور کشتی جای می‌گرفت و کمی حجم ماشین، نواقص آن را می‌پوشانید. حدود سال ۱۸۸۵ ماشین نوساندار هنوز در آخرین کشتیهای چرخدار، بویژه کشتیهایی که در کانال مانش آمدورفت داشتند، درکار بود (رجوع کنید به‌شکل ۸۸ جلد سوم، صفحهٔ ۴۶۴).

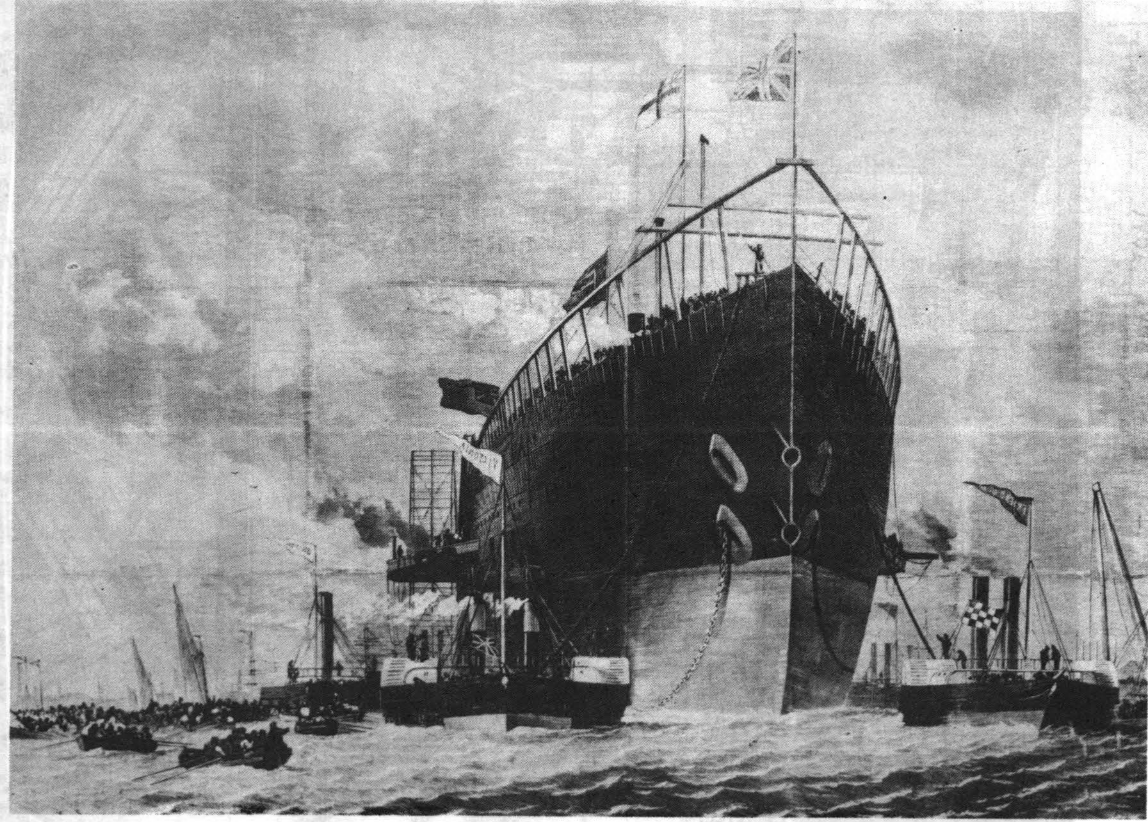
ماشینهای کشتیهای پروانه‌دار: از سال ۱۸۴۵ کاربرد پروانه در کشتیها رو به افزایش گذاشت. از این پس محور موتور به درازا در بدنهٔ کشتی و در پایین کارگذاشته شد، درحالی‌که در کشتیهای چرخدار در پهنای کشتی و در بالا قرار داشت. وانگهی پروانه، این پیشبرنده جدید، نیاز بسرعت دوران بسیار بیشتری داشت. در مجلد پیش، ماشینهای مشابه ماشین کشتیهای چرخدار توضیح داده شدند؛ اینها یک چهارم دور در صفحهٔ کشتی نوسان داشتند و یک جعبه دندهٔ چند برابرکنندهٔ سرعت، بدانها متصل کرده بودند. بدیهی است این یک راه‌حل زودگذری بود و بزودی انواع خاصی از این ماشینها وارد عمل شدند.

بمنظور ساده کردن مکانیسم این ماشینها، چند نوع ماشینهای افقی با بازوی مستقیم و با قرار دادن چهار سیلندر متقابل مورد آزمایش قرارگرفتند. با این کار به نامناسب بودن بازوهای بسیار کوتاه پی‌بردند، این نکته در بحث در فرصت ماشینهای عمودی، مانند ماشینهایی که درکشتیهای چرخدار به‌کارگرفته شده بودند، گوشزد شد.

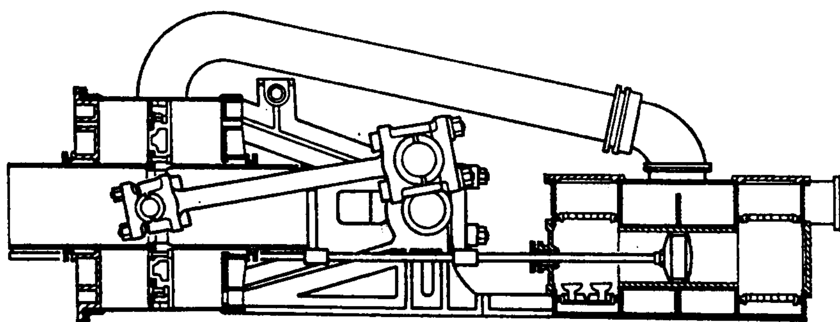
ماشین جعبه‌ای: این نوع ماشین را آقای جان‌پن اختراع کرد. در این ماشینها سیلندر به‌طور افقی کنار لبهٔ کشتی قرار دارد. سیلندری توخالی که میله‌ای در داخل آن به پیستون عمود می‌شود و به‌جای شاتون عمل می‌کند و بنابراین نوعی ماشین بدون شاتون است که امکان رفت و برگشت در آن محفوظ مانده است (شکل ۱۶). مکانیسم این ماشین بسیار ساده بود: طول بازو به‌آسانی می‌توانست شش برابر شعاع لنگ ماشین باشد، که اصلاح خوبی بود. اما سطح جعبهٔ ماشین قدرت خنک‌کنندگی چشمگیری داشت، کاسه‌نمدهای آن آب‌بندی بدی داشتند و سیلندرها قطرشان بزرگ



تابلوی ۱. تلمبهٔ آتش‌نشانی در شایو ۱۸۵۳. ـ ۱۸۵۲



تابلوی ۲. کشتی باری اقیانوس‌پیمای گریت ایسترن ۱۸۵۸.



شکل ۱۶.ماشین جعبه‌ای کشتیها، نمای عرضی کشتی. در میانه: محور پروانه؛ در چپ: سیلندر؛ در راست: کندانسور.

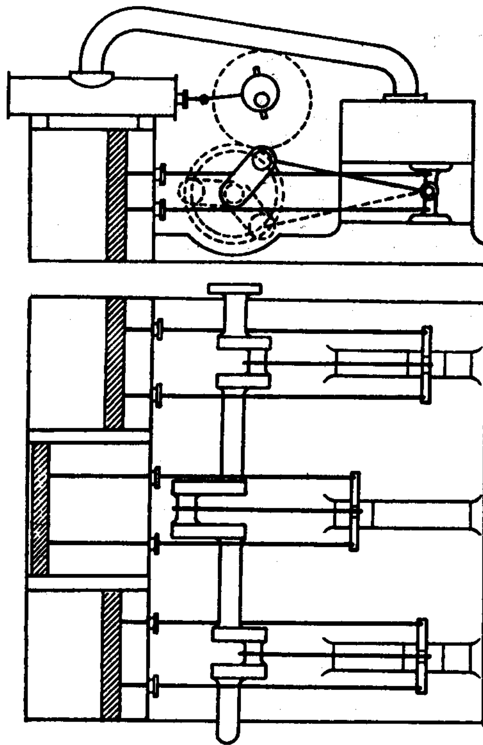
شده بود. معذلک این ماشین جعبه‌ای در کشتیهای انگلیسی رواج بسیار یافته بود.

ماشین با شاتون گردان: در فرانسه ماشینهای دارای شاتون گردان به احترام دریاسالار دوپویی دوسوم و مازلین[1] اهل لوهاور ترجیح داده شدند. در این نوع ماشین، سیلندر به‌طور افقی کنار یک لبهٔ کشتی گذاشته می‌شد. دو میلهٔ موازی، که از محور فراتر می‌رفتند به پیستون وصل می‌شدند. مفصل شاتون روی پلی قرار داشت که سرهای این دو میله را به یکدیگر متصل می‌ساخت (شکلهای ۱۷ و ۱۸).

دو سیستم پیشین نقایص مشترکی داشتند: ماشین خیلی توی هم رفته بود و دسترسی به قطعات مختلف آن دشوار؛ بنابراین اداره و تعمیر آن بسیار سخت انجام می‌گرفت. سیلندرها که افقی بودند احتمالاً در زیر بار پیستونها تخم‌مرغی می‌شدند؛ این تخم‌مرغی شدن که همان‌طورکه دیده شد در مورد ماشینهای ثابت افسانه‌ای بود، در مورد ماشینهای بخار کشتی به‌علت ابعاد بسیار بزرگی که داشتند واقعیت داشت.

ماشین هاونی: اما این نوع ماشین بخار، که بالاخره در کشتیها به‌کار گرفته شد ماشینی نبود که ویژهٔ کشتیها طرح شده باشد. در واقع ماشین بخار ویژه کشتیها، ماشین هاونی است که، همان‌طورکه در گذشته دیدیم، یکی از دو نوع اصلی ماشین بخار ثابت ـ از ردیف ماشینهای پیستوندار را تشکیل می‌دهد. ما همچنین گفتیم که این نوع ماشین برای موتورهای بزرگ پیستونی آن روزگار، که دیزل بودند، تنها ماشین رایج بود. در کشتیها ماشین دیگری به‌کار گرفته نمی‌شد. نوع هاونی در سالهای پس از ۱۸۷۰ در کشتیهای بخاری متداول شد. علت این امر افزایش فشارها در آن زمان بود. نه ماشینهای دارای شاتون برگشته و نه مطلقاً ماشینهای جعبه‌ای نمی‌توانستند فشارهای جدید را

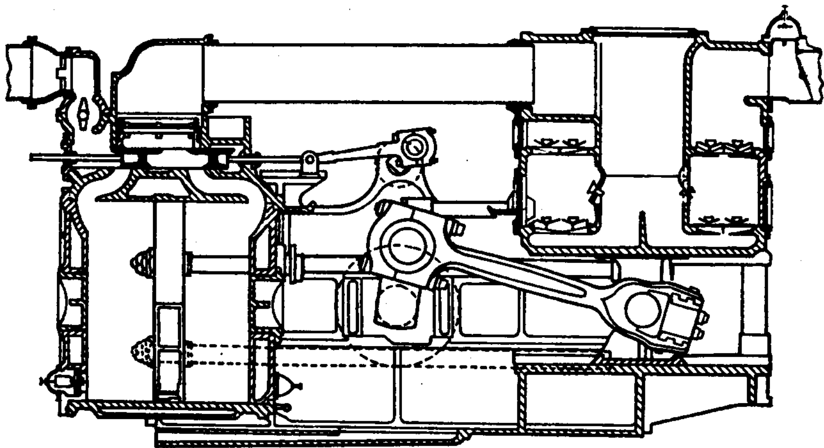
1. Mazeline



شکل ۱۷.ماشین کشتی با شاتون گردان.
در بالا: مقطع عرضی کشتی؛ در پایین: نمای افقی.
این ماشین سه سیلندر و دو انبساط دارد (نوع دوپویی دولوم).

با حفظ آب‌بندی خود تحمل کنند. وانگهی ماشینهای هاونی برای انبساط دوگانه بسیار مناسب بودند، تنها می‌بایست دو سیلندر با ابعاد مختلف را به‌طور عمودی روی آنها نصب کرد. آقای بنژامن نورمن که یکی از پیشتازان ساخت ماشینهای چند انبساطی بود در سال ۱۸۶۵ از ماشین هاونی در کشتی استفاده کرد.

دربارهٔ رواج سریع این نوع ماشین که حدود سال ۱۸۸۰ در همه‌جا دیده می‌شد بیش از این چیزی نمی‌گوییم و سخن خود را تنها با ذکر این نکته به‌پایان می‌بریم که دیزلهای بزرگ کشتیهای



شکل ۱۸.ماشین با شاتون گردان، در حین کار سمت چپ: سیلندر؛ میانه: محور پروانه؛ راست: کندانسور.

امروزی که موتورهای بسیار قوی پیستونی دارند از نوع هاونی می‌باشند. ماشین بخار با شاهنگ پایین مربوط به قایق تندرو اسفنکس نخستین ماشین بخار کشتی فرانسوی بود. این ماشین ۱۶۰ اسب قدرت داشت، درحالی‌که موتور دیزلی کشتی مسافربری فرانس دقیقاً هزار برابر آن: ۱۶۰۰۰۰ اسب قدرت دارد.

ارزیابی قدرت، نابهنجاریهای بازده، نظریهٔ تجربی

کارایی نظری، محاسبهٔ آن: حدود سال ۱۸۲۰ ارزیابیهایی قدرت یک ماشین بخار هنوز سیمایی بسیار کهنهٔ داشت. محاسبهٔ آن تقریباً چنین انجام می‌گرفت.

یک کارایی نظری و یک کارایی مفید تشخیص می‌دادند. محاسبه کارایی نظری را از روی طرح تعیین می‌کردند یا بدین شکل انجام می‌گرفت که چگونه می‌تواند این کارایی در یک ماشین موجود حداکثر باشد. مسأله مربوط به محاسبه قدرتی بود که در مجلد پیشین توضیح داده شد و بر پایه ارزیابی فشاری که بخار بر پیستون وارد می‌کرد. مقدار فشار، سطح پیستون، طول رفت پیستون و مدتی که این حرکت طول می‌کشد فاکتورهایی بودند که می‌بایست در محاسبه شرکت داده شوند.

برپایه کاری که بتانکور در سال ۱۷۹۰ منتشر ساخت دانسته شد که فشار معکوس کندانسور باید از این مجموع کسر شود.

محاسبهٔ ماشینهای کم فشار یا ماشینهای پرفشار بدون دتانت دشوار نیست. مورد اخیر خیلی بیش از حد تصور وجود دارد. همچنین گویا قاعده‌ای برای لوکوموتیوهای اولیه وجود داشت. در این لوکوموتیوها فشار بخار در تمام مدت رفت پیستون ثابت می‌ماند و محاسبهٔ قدرت به یک عمل ضرب خلاصه می‌شد.

اما ماشینهای دارای دتانت وضع بکلی دیگری دارند. شگفت‌آور است که روش نمودارسازی بسیار ساده‌ای که وات آن را پیشنهاد کرد (رجوع کنید به جلد سوم، صفحهٔ ۱۳۰، شکل ۶۲) با موفقیتی روبه‌رو نشد. شاید علت شکست آن این بود که عوامل محدودی بوسیلهٔ آن نشان داده می‌شدند، مانند نشانگر وی که در جای خود، باز از آن سخن خواهیم گفت. به‌هرتقدیر می‌توان ادعا کرد که در فرانسه که از ماشین وولف استقبال شایانی شد، و حال‌آنکه روش کار در مراحل ابتدایی خود باقی مانده بود. آقایان آشت[1] و پرونی از اینکه توانسته بودند متوسط فشار را در آغاز و پایان رفت پیستون داشته باشند خرسند بودند. آقای هرون اهل ویلفوس[2] کمی دقیقتر کار کرد. او فشار بخار را در پنج نقطه با فاصلهٔ مساوی ارزیابی می‌کرد: شروع حرکت پیستون، پس از طی ربع مسیر، میانهٔ مسیر، سه‌چهارم و بالاخره پایان حرکت پیستون (۱۸۱۹). در همهٔ این موارد مقدار فشار را متناسب با عکس حجم فرض کرده است. ما بعدها این مسأله را رسیدگی خواهیم کرد.

آقای پرونی در سال ۱۸۲۶ فرمولی را پیشنهاد کرد که برپایهٔ محاسبهٔ تقریبی یک انتگرال معین بود و برای این کار روشی را به‌کار گرفت که مبتذل می‌نمود و که در سال ۱۷۹۰ بیان شده بود. آقای سعدی کارنو خود را وقف تحقیق فرمولی در این‌باره کرد اما یادداشتهایش مدتها بعد، و تنها در سال ۱۹۶۶ انتشار یافت. مناسبترین روش کار استفاده از لگاریتم به‌اصطلاح طبیعی، نپرین یا هذلولی بود. آقای پرونی در مجله *Annales des Mines* سال ۱۸۳۰ جدول بسیار کاملی در این‌باره به چاپ رسانید. آقای آرتور مورن نیز در سالهای ۱۸۳۸ و ۱۸۴۳ در نشریه Aide-mémoire de mécanique pratique خود به چنین کاری دست زد. مهندسان در اواخر سدهٔ نوزدهم چنین روشی را عموماً مورد استفاده قرار می‌دادند، اما معلوم نبود که این روش از کی عمومیت یافته است. بدین‌ترتیب، برای اینکه در عمل از آن استفاده شود تنها کافی بود که مقادیر لگاریتمهای مربوطه را برای اعداد صحیح از ۱ تا ۱۰ تا چهار رقم اعشاری دانست. معلوم است که در اینجا مطمئناً تهیهٔ جداولی که مستلزم محاسبات سرگیجه‌آور باشد منظور ما نیست. دلیل ساده‌ای که جداول معمولی را نمی‌توان در این مورد به‌کار گرفت، رواج این روش را تا مدتها به تأخیر افکند.

---

۱. Hachette ژان نیکلاپیر ۱۷۶۹ ـ ۱۸۳۴ ریاضیدان فرانسوی

2. Heron de Villefosse

نشانگر وات و اندازه‌گیری قدرت اسمی: دیده می‌شود که در دوران که مورد بررسی ما است محاسبهٔ فشار بخار بر پیستون باز هم ساده‌تر شده است. در آن دوران هنوز هیچ‌گونه وسایل سنجش مستقیم این فشار ساخته نشده بود. با این‌حال، از حدود سال ۱۷۹۶ وسیلهٔ مخصوص این سنجش وجود داشته است و این همان نشانگر وات است که در مجلد پیشین (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحهٔ ۱۳۱،شکل۶۳) از آن سخن رفته است. رواج آن تنها پس ازگذشت سالهای زیاد سرعت گرفت.

کاربرد این نشانگر در سوهو برای مدتهای مدید محدود باقی ماند. از آن تنها برای تنظیم ماشینها در کارخانه، پیش از تحویل آنها استفاده می‌شد. آقای دیکینسون حکایت می‌کند که چگونه آقای فیری در سال ۱۸۲۶ شاهد کاربرد آن در روسیه بوسیلهٔ عوامل اصلی مؤسسه وات ـ بولتون بوده است و چگونه وی این نشانگر را از آنجا به انگلستان بازگردانیده است. معذلک آقایان هیلز[1] و پیسی[2] در سال ۱۹۷۲ یک سند انگلیسی مربوط به تاریخ ۱۸۲۲ در این‌باره ارائه داده‌اند. بدون در نظر گرفتن جزئیات امر، درهرحال روشن است که این یک راز حرفه‌ای بود تنها پس از گذشت ۲۵ تا ۳۰ سال افشا شد.

در فرانسه طبیعی است که کمی تأخیر وجود داشته باشد. نوشته‌ای از سالهای ۱۸۲۷ ـ ۱۸۲۸ که آقای کریستین[3]، مدیر کنسرواتوار پیشه و هنر به چاپ رسانیده است ظاهراً در این‌باره نخستین مدرک است. پس از وی آقای کلاپیرون در بازگشت از روسیه که مدت ده سال (۱۸۲۰ ـ ۱۸۳۰) در آنجا بود در سال ۱۸۳۴ مقاله مشهوری انتشار داد که طی آن از سیکل کارنو، نمایشی به‌شکل نمودار نشانگر وات می‌ساخت. آقای شارل کومب در همین زمان، پس از یک سفر تحقیقی به انگلستان، این نشانگر را گزارش می‌کند. در آن زمان، نوع کامل شده‌ای به‌کار گرفته می‌شد که مک‌نات[4] ساخته بود. وسیلهٔ اخیر می‌توانست وضع ماشین را در زیر فشار و سرعتهای بسیار بالا نشان دهد.

چنین می‌نماید که حدود سال ۱۸۴۰ بود که ساخت و کاربرد این وسیله به‌طور قطعی در فرانسه رواج گرفت. آرتور مورن، کارشناس پرآوازهٔ اندازه‌گیری مقدار کار مکانیکی با وسایل ثباتدار، بنوبهٔ خود اصلاحاتی در این نشانگر وارد ساخت. پس از وی آقایان گوستاو ریشار[5] و کراسبی[6] مدل قطعی آن را، که مناسب فشار و سرعت زیاد بود تهیه کردند.

1. Hills 2. Pacey 3. Christian 4. Mc Naught 5. G. Richard 6. Crossby

محاسبهٔ نمودارها: بدین‌ترتیب توانستند مفهوم اسب اسمی (ارزیابی شده) را به‌دست آورند. هنوز از جهت محاسبهٔ سطح نمودار، دشواریهای مهمی وجود داشت. نخست از روش سیمپسون[1] برای این کار استفاده شد. در این روش از ده محور عرضی همفاصله که روی نمودار اندازه گرفته شده بودند یک محور عرضی میانگین را حساب می‌کردند. یک محاسبه تکمیلی فشار متوسط را می‌داد. *این روش نتایج خوبی داشت، اما طاقت‌فرسا بود و در مواقعی که می‌بایست صدها نمودار* محاسبه شوند ـ در آزمایشهای مهم چنین بود ـ اجرای بسیار دشواری داشت.

پیشنهاد شد که نمودارها را تکه‌تکه و آنها را وزن کنند همچنین از کاغذ شطرنجی استفاده شود. در اواخر سدهٔ نوزدهم این دو روش کمتر توصیه می‌شدند.

روشی که بسیار صحیح جواب می‌داد ارزیابی سطح نمودار بوسیلهٔ انتگرالگیر مکانیکی بود که سطح‌یاب امسلر[2] نام داشت. در آن زمان این کار به دنبال کردن محیط نمودار با یک سوزن رسام محدود بود. آقای امسلر که در شافهاوزن[3] استاد بود وسایل گوناگونی برای این کار در سال ۱۸۵۵ طرح کرد. کمی پس از آن خود وی ادارهٔ یک مؤسسه ابزار دقیق را به‌عهده گرفت.

آقای امه ویتز در سال ۱۹۱۳ نوشته است: «رسم یک نمودار خوب بیشتر هنر می‌خواهد تا دانش؛ برای این کار دقت، آزمودگی و آموزش لازم است زیرا در یکبار هیچ‌کس موفق نخواهد شد.»

کارایی: تا کنون ما از بازده نظری ـ آن‌طور که در گذشته اصطلاح شده بود ـ سخن گفته‌ایم؛ ما چگونگی آن را شرح دادیم و دیدیم که چرا این ارزیابی تنها در محاسبات مؤسسه سازنده باقی ماند و در آزمایش ماشینهای موجود به‌جای آن از قدرت ارزیابی شده گفت‌وگو می‌شد.

ما، همچنین دیدیم که حدود سال ۱۸۲۰ بود که به مفهوم کارایی پی‌بردند. در اینجا تنها باید بگوییم که در آن دوره چه تعریفی از آن داشتند و چگونه بر پایهٔ آن به مفهوم کنونی قدرت مفید رسیدند.

در اصل، هر ماشین که جهت انجام دادن وظیفهٔ خاصی ساخته شده باشد در آن تنها به مقایسه مقدار زغال سوخته شده در دیگ بخار و مقدار وظیفهٔ انجام شده بوسیلهٔ ماشین «گیرنده» یعنی در حال کار اکتفا می‌کنند. روش اندازه‌گیری مقدار آب مصرفی که بسیار آسان و بدقت انجام‌پذیر بود بزودی به‌عنوان ملاک به‌کار گرفته شد. بدین‌ترتیب بود که در انگلستان در روزگار اسمیتون مفهوم duty مطرح شد، اصطلاحی که فرانسویان آن زمان آن را *effet* ترجمه کردند. علت این بود که

1. Simpson

۲. Amsler یاکوب ۱۸۲۳ ـ ۱۹۱۲ ریاضیدان سویسی در شمال آن کشور، در ساحل شمالی راین

۳. Schaffhausen یکی از کانتونهای سویس

در آن زمان، چه عامل زمانی را در حساب می‌آوردند یا نه، همین اصطلاح را به‌کار می‌گرفتند، به‌طوری‌که بنابر متون موجود، اصطلاح effet هم به‌معنای کار بود و هم قدرت. با این‌حال، در ربع نخست سدهٔ نوزدهم، اصطلاح effet رفته‌رفته منحصراً معنی قدرت را می‌داد، زیرا در عمل اغلب اوقات به قدرت توجه داشت تا کار.

این نظر درستی بود، بخصوص اینکه در اندازه‌گیری مقدار آبی که بوسیله تلمبه‌ای که با ماشین بخار کار می‌کرد. بالا می‌آمد در واقع کار این ماشین اندازه‌گیری نمی‌شد و با این کار مرتکب اشتباه می‌شدند زیرا مقداری از قدرت، جذب انواع اصطکاکها می‌شد؛آنها بدین امر واقف بودند اما نمی‌توانستند مقدارش را اندازه بگیرند.

این مسأله چنان حقیقت داشت که نویسندگان آن دوران در زیر عنوان effet utile دو موضوع کاملاً مختلف را تعریف می‌کردند.

ضریب محاسبهٔ effet utile: یکی از آنها محاسبه شده بود، و آن قدرتی بود که به حق از ماشینی که بازدهٔ نظری آن را می‌دانستندنی‌انتظار داشتند. این موضوع را به‌طورکلی ضریب $\frac{۲}{۳}$ می‌نامیدند. این تقسیم بر ۳ در آن زمان از کار روزمره آقای بلیدور (آغاز سدهٔ هجدهم) به‌دست آمده بود و احتمالاً در دورانی بسیار پیش از وی نیز به‌کار گرفته می‌شد. آقایان پونسله و پرونی نیز در سالهای ۱۸۲۰ ـ ۱۸۲۵ آن را مجاز می‌شمردند. تنها تغییری که در این ضریب پدید آمد تطبیق دادن آن در پیروی از قدرتهای مختلف بود. حدود سال ۱۹۰۰ مهندسان برای ماشینهای کوچک از ۵ تا ۱۰ اسب، ضریب ۰٫۶ را پذیرفتند و برای ۱۰۰ اسب ضریب ۰٫۸ و بالاخره در ماشینهای ۳۰۰ اسب ضریب ۰٫۸۵ را به‌کار گرفتند. آقای امه ویتز در سال ۱۹۱۳ چنین اظهار عقیده می‌کند: «ما اعتراف می‌کنیم که همه این ارقام، از مقوله تجربهٔ ناب هستند، اما به کمک آنها به نتایج قابل قبول رسیده‌ایم؛ بنابراین روشی درست است.»

effet utile که با مهار اندازه‌گیری شده یا قدرت مؤثر: باید گفت که تحت عنوان effet utile واقعاً توانستند کار انجام گرفته را اندازه بگیرند. روشن است که یک اندازه‌گیری درست، می‌بایست روی محور خود ماشین، درحالی‌که کار معمولی خود را انجام می‌دهد به‌عمل آید. این کار تا سال ۱۸۲۱ انجام نگرفت. در این سال بود که آقای پرونی کاربرد لگام دینامومتری را شناسانید و نام وی بر این لگام مانده است. آقای پرونی، مدیر پرآوازه مدرسهٔ پل و راههای شوسه در آن زمان در یک دادگاه به‌عنوان کارشناس برگزیده شده بود و می‌بایست یک ماشین قدیمی و یکطرفهٔ وات را که در سال ۱۷۸۸ برادران پریه آن را تهیه کرده بودند با یک ماشین جدید وولف که آقای ادواردز

بتازگی تحویل داده بود مقایسه کند. دربارهٔ لگام پرونی، جز اینکه بگوییم که بسرعت رواج یافت و اصول آن دستخوش هیچ تغییری نشد سخن دیگری نداریم. با این‌همهٔ می‌بایست آن را، برای اینکه بتواند در سرعتها و قدرتهای زیاد استحکام داشته باشد، اصلاح می‌کردند. آقای پرونی از وسیله‌ای با طوقه‌های انعطاف‌ناپذیر استفاده می‌کرد و در ۱۸۲۱ توانست ۱۲ تا ۱۵ اسب با ۱۶ دور دقیقه را اندازه بگیرد. بعدها لگامهای انعطاف‌پذیری ساختند که از یک تسمه آهنی یا فولادی نرم و مجهز به سطوح اصطکاک چوبی که داخل یک نیمدایرهٔ جالب مربوط به دورهٔ طبل، یا یک فلکه متصل به محور آن بود تشکیل می‌شد. لازم بود که از جریان پیوسته‌ای از آب صابون استفاده شود. برای قدرتهای زیاد، فلکه‌هایی به‌کار می‌بردند که جریانی از آب سرد از داخل آن را خنک می‌ساخت؛ در این‌صورت، لگام شکل تازه‌ای ـ لگام طنابی ـ به خود می‌گرفت. یک سر این لگام در جایی ثابت نگاه داشته می‌شد و سر دیگر آن را وزنه‌ای کشیده می‌داشت. این دستگاه با گرافیت مداد رونوازی می‌شد. بدین‌ترتیب، آزمایشهای چندین ده ساعتی با این لگام انجام‌پذیر می‌شد.

دقیقتر شدن تدریجی مفهوم بازده: زمانی‌که مقدار زغال مصرفی در مدت زمان معلوم برای تولید قدرت معینی را درنظر می‌گیرند، ارزیابی بسیار غیردقیقی انجام داده‌اند. در واقع، ماشین بخار، بخار را مصرف می‌کند نه زغال را. این دیگ بخار است که زغال مصرف می‌کند و دیگ بخار نیز قدرت و بازدهٔ خاص خود را دارد.

همان‌گونه که دیده شد مهندسان اواخر سدهٔ هجدهم بنوعی تخمین کلی، خشنود بودند. بعدها، در ربع نخست سدهٔ نوزدهم رفته‌رفته به بررسی دقیق دیگ بخار پرداختند و آزمایشهای چندی در این‌باره انجام گرفت. نه‌تنها انتقاد از سیستمهای موجود رواج یافت بلکه بدیهی است که به تعیین استانده‌های عملی برای سازندگان آتی نیز دست زدند. رفته‌رفته به‌وجود و بازده مشخص: دیگ و ماشین، پی‌بردند.

آیین‌نامهٔ مسابقه‌ای مربوط به سال ۱۸۴۸ نشان می‌دهد که در این اوان این دو نوع بازده بخوبی روشن بودند: مسابقه برای ساخت ماشینی بود که با هر کیلوگرم آب «بخار شده یا وارد به دیگ» مقدار ۴۰۰۰۰ کیلوگرم متر اسمی یا ۳۰۰۰۰ کیلوگرم متر واقعی کار تولید کند. مقدار کار مورد نظر نه به‌مقدار زغال مصرفی بلکه به‌مقدار بخار بستگی داشت.

از نظر تعبیر دقیق کلام عبارت «یا وارد به دیگ» قابل تأمل است. مفهومی که در پشت آن نهفته، نشان‌دهندهٔ تردیدهای بسیاری است که در این زمان درباره کار واقعی ماشینهای بخار وجود داشته است و فرضیهٔ نادرستی که برای پاسخ دادن به مسائل حل ناشده سرهم‌بندی کرده بودند.

اما پاسخ درست این مسأله چگونه قدم‌به‌قدم به‌دست آمد، این بحثی است که هم‌اکنون در زیر بدان خواهیم پرداخت.

کمیت گمشده: از مدتها پیش، گرچه نمی‌توان بدقت گفت از کی؟ ـ گفته شده بود که ماشینهای بخار، بیش از اندازه، آب مصرف می‌کنند. بررسیها هرقدر دقیقتر شد، کمیت این آب گمشده، شگفتی‌آورتر گردید.

در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم توزین بخار مربوط به حجم یک سیلندر، بسیار تقریبی بود و از آب وارد شده به دیگ همیشه کمتر نشان داده می‌شد. این پدیده در لوکوموتیوها بیشتر شگفت‌انگیز بود. در سال ۱۸۳۵ نویسنده‌ای بسیار بداخلاق اما بسیار فعال با نام کوییونو دو پامبور[1] دربارهٔ لوکوموتیو رساله‌ای نگاشت، وی مسألهٔ بسیار ساده‌ای را توضیح داد که بعدها توجه بسیاری را به خود جلب کرد: اضافی آب وارد شده به دیگ به‌نظر وی به‌شکل مه با بخار خارج می‌شود. این پدیدهٔ همراهی مه با بخار، توهم نیست اما مقدار آن‌هم هرگز از ۵٪ کل آب فراتر نمی‌رود ـ چیزی که بعدها تأیید شد. اما در سال ۱۸۳۵ مسألهٔ اتلاف آب از ۱۵ تا ۴۰٪ مطرح بود و مقدار آن بستگی بطرز کار دیگ داشت. این توجیه همراهی آب با بخار را در سال ۱۸۳۰ آقای هیکرافت[2] پیشنهاد کرد. وی وزن بخار آب را که از روی نمودار تعیین کرده بود با وزن آب میعانی مقایسه کرد و تفاوت ۳۰٪ را به‌دست آورد. شکی نیست که آقای پامبور که آزمایشهای خود را روی لوکوموتیوها در انگلستان انجام می‌داد این اندیشه را از هیکرافت گرفته بود. بعدها در سالهای ۱۸۴۳ ـ ۱۸۴۴ آقای فریمو[3] نیز در فرانسه به بررسیهایی دربارهٔ مقدار گرمایی که به کندانسور می‌رود پرداخت و مقادیر آن را با مقادیری که مطابق نمودار باید شامل بخار آزاد شده باشد مقایسه کرد. وی تفاوت را ۴۰ و حتی ۵۰٪ یافت، اما نتوانست علت را بیان کند. طبیعی است که بازده ماشین بر افزایش درصد آب همراه با بخار با تناسب مستقیمی کاهش می‌یابد زیرا باید برای گرم کردن این مقدار آب، که هیچ‌گونه نقشی در موتور ندارد مقداری زغال صرف کرد. در سالهای ۱۸۵۰ ـ ۱۸۶۰ این بحث هنوز به‌جایی نرسیده بود. در پرتو کارهای نشانگر وات و جدولهای آقای رنیو[4] که در سال ۱۸۴۷ انتشار داد از آن پس وزن بخار که در سیلندر ـ طی یک ضربهٔ موتور ـ مؤثر بود با دقت محاسبه می‌شد. اما این بررسیهای جدید ـ گرچه دقیقتر از بررسیهای پیشینیان بودند، تنها جهت کلی بررسیهای اخیر را تأیید می‌کردند.

---

1. Guyonneau de Pambour 2. Haycraft 3. Frimot

۴. Regnault هانری ویکتور ۱۸۱۰ـ۱۸۷۸، شیمیدان و فیزیسین فرانسوی

قانون دتانت (کاهش فشار): مسألهٔ دیگری که تا مدتها حل ناشده مانده بود، اما از آن کمتر سخن می‌رفت ـ زیرا برخلاف «آب همراه» مستقیماً به این اتلاف قابل‌توجه آب مربوط نبود، این بود که دتانت بخار پشت پیستون طبق چه قانونی عمل می‌کند؟

در اواخر سدهٔ هجدهم و اوایل نوزدهم، تردید نداشتند که این مورد با قانون ماریوت سازگار نیست. این عقیدهٔ کسان برجسته‌ای همچون آقایان پرونی و سعدی کارنو و شمار زیاد دیگری بود. آنان با در نظر گرفتن خنک شدن، فکر می‌کردند که فشار در مدت دتانت می‌بایست کمتر از فشاری باشد که با محاسبه به‌دست آمده است. اما این بررسیهای کار ماشین نبود که بتواند دقایق پاسخ را به ما بدهد. وانگهی وات در نموداری که درگذشته مورد بحث قرار گرفت در ضمن می‌پذیرد که دتانت طبق قانون ماریوت انجام می‌گیرد.

دیدیم که پونسله در سال ۱۸۲۵ در مدرسه توپخانه و مهندسی شهر مس یک دوره درس مکانیک عملی ماشینها را اضافه کرد. وی در این کار، روشی کاملاً مستبدانه داشت، و به پشتوانهٔ شخصیت برجسته خود در هندسه، نظر خود را در همه‌جا تحمیل کرد. معلوم است که در مورد گازها قانون ماریوت تنها درصورتی دقیقاً مصداق دارد که گاز در مدت تغییر حجم خود دستخوش هیچ تغییر دما نشود. آقای پونسله فکر کرد که بخارآب نیز باید همین وضع را داشته باشد. بخارآب که در دیگ در دمای مربوط به فشارش حالت اشباع می‌یابد، به‌نظر وی تنها لازم است که از هرگونه خنک شدن آن طی مرحله دتانت، جلوگیری شود و تنها در چنین صورتی قانون ماریوت در مورد آن مصداق خواهد داشت. چنین می‌نماید که در آن زمان هیچ‌کس نمی‌دانست که بخاری که چنین دتانتی داشته باشد در پایان مسیر، حالت بخار داغ را دارد و چیزی که افکار پژوهشگران آن زمان را به خود مشغول کرده بود این بود که اقدامات لازم برای جلوگیری از سرد شدن به‌عمل آید. آقای ژاک آرمنگو حتی در سال ۱۸۶۱ نوشته بود: «لازم است که وسایلی که دتانت در آنها انجام می‌گیرد بخوبی کنترل شوند تا از خنک شدنهای از خارج جلوگیری شود وگرنه بخار دتانت شده مایع می‌شود و کاربرد قانون ماریوت درست نخواهد بود.»

این نظریه که از مغز هندسه‌دان پونسله تراوش کرده بود چنانچه یک تأیید عملی پشت آن نبود احتمالاً بزودی مورد اعتراض قرار می‌گرفت. در واقع می‌توان گفت که طی ربع نخست این سده دانشمندان برای اینکه بفهمند در سیلندر چه می‌گذرد هیچ وسیله‌ای نداشتند.

اما از زمانی‌که ابزار شایستهٔ نشانگر، در اختیار آنها قرار گرفت همه‌چیز تغییر یافت. آنان تقریباً به‌طور منظم خطوطی به‌دست می‌آوردند که با قانون ماریوت سازگار بود. آقایان گوئن[1] و لوشاتلیه

1. Gouin

پس از عملی کردن آزمایشهای دقیق روی لوکوموتیوی که در ساحل راست خط پاریس ـ ورسای رفت‌وآمد می‌کرد، چنین نوشتند: «طی مدت دتانت، فشارهای بخار با دقت کافی از قانون ماریوت پیروی می‌کنند.» این آزمایشها به مباحثات پایان داد. بهتر دانستند که این واقعیت را ندیده بگیرند که این سازگاری با یک قانون فیزیکی کاملاً جا افتاده و بخصوص دارای شکلی ساده، در این مورد خاص، نوعی نابهنجاری است.

ترمودینامیک و ماشین بخار: در سالهای پس از میانهٔ این سده، ترمودینامیک دانش کاملی شده بود. دو یادداشت مهم آقای ژول تاریخهای ۱۸۴۵ و ۱۸۴۹ برخود دارند. آنها در سال ۱۸۶۲ در *Annales du Conservatoire des Arts et Métiers* به زبان فرانسه ترجمه و منتشر شدند. در سال ۱۸۶۴ بود که کلاوزیوس خاطرات خود را که متوالیاً از سال ۱۸۵۰ به بعد انتشار داده بود در یک مجلد گرد آورد. این مجموعه در ۱۸۶۸ به فرانسه ترجمه شد. در مورد رسالهٔ آقای رنکین، که نخستین اثر کامل دربارهٔ ماشینهای بخار است و زمانی تهیه شده بود که ترمودینامیک شکل گرفته بود، گرچه در سال ۱۸۵۹ به انگلیسی انتشار یافت تا ۱۸۷۸ به زبان فرانسه ترجمه نشده بود.

با این‌حال، این دانش تازه هیچ‌گونه مساعدتی به مهندسان آن روزگار نکرد. سالهای بعد، زمانی‌که بررسی دستگاههای یخساز، موتورهای درونسوز و توربینهای بخار مطرح شدند، کارایی این رشته از دانش آشکار شد. موفقیتهای جالب این رشتهٔ علمی، همان‌طورکه خواهیم دید، در زمینه‌ای کاملاً غیرمنتظره ـ شیمی ـ بود.

اما آنهایی که مأمور بررسی ماشینهای بخار پیستوندار بودند از رشتهٔ ترمودینامیک سود چندانی عایدشان نشد. آقای موریس دمولن[1] در سال ۱۸۹۵ در این‌باره چنین نوشته است: «در این مورد ما تنها چند سطر به‌دست خواهیم آورد، زیرا چنین می‌نماید که ترمودینامیک محض، جز مورد افزایش فشار برای ماشین بخار، پیشرفت تازه‌ای نمی‌بیند. این دانش به‌شکل زمخت و ساده‌ای کار خود را به محاسبهٔ بازده نظری یک ماشین بخار ایده‌آل، که گویا اتلاف خارجی و داخلی ندارد محدود کرده است و به‌طریق اولی کاربرد گرما در یک ماشین واقعی بنحوی است که یک مهندس می‌تواند با مصالح موجود آن را بسازد.»

نویسنده بالا سپس چند رقم جالب به‌دست می‌دهد. از سال ۱۸۸۰ تا ۱۸۹۵ فشار بخار کاری موتور از ۵ به ۱۰ کیلوگرم، و بازده نظری آنها از ۰٫۲۲۷ به ۰٫۲۷۳ رسید.

بنابراین، گرچه رشتهٔ ترمودینامیک به مهندسان آموخت که محدوده‌ای وجود دارد که هرگز

1. M. Demoulin

نمی‌توانند از آن بگذرند اما دربارهٔ وسایلی که نزدیک شدن به این محدوده را ممکن می‌سازند هیچ کمکی عرضه نکرد. نظریه‌ای که آقای هیرن[۱]. بدان نامی عمومی داده بود در آن زمان در اوج شکوفایی قرار داشت. این نظریه، ماشین بخار را مستقل از مصالح سازنده آن بررسی می‌کند. این نظریه ناگزیر بنوعی آرمانی شدن انجامید که احساس می‌شود در سال ۱۸۶۰ این بررسی در نارساییهای آن بیهوده مدفون شد.

سیکل رنکین، نموداری ایدآلی: دقیقاً در چنین زمانی است که نمودار معروف به سیکل رنکین مطرح می‌شود. کلیات این سیکل با وجود خدماتی که آیندگان بدان کردند نمونهٔ خوبی از همان گرایشی است که چند لحظه پیش آن را مورد انتقاد قرار دادیم.

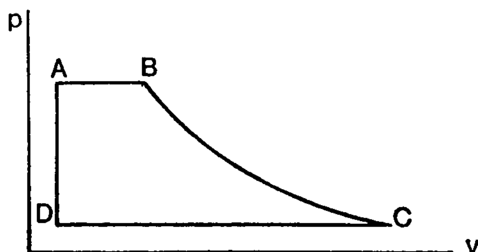
ببینیم سیکل رنکین چیست؟ به‌طور ساده می‌توان گفت که برداشتی از نشانگر است که همهٔ «نابهنجاریهایی» را که همواره در طرز کار یک ماشین واقعی وجود داشته است، ناپدید می‌کند. آقای رنکین می‌نویسد: «خمهایی که روی نشانگر به واقع تشریح شده‌اند، از نظر طرز تغییر فشار و حجم بخار، زمانی‌که روی پیستون عمل می‌کند با یکدیگر تفاوت دارند؛ چنان‌که توضیح آنها بوسیلهٔ یک سیستم کلی از فرمولهای ریاضی محال است . . . برای اینکه محاسبه قدرت و بازده سیال در ماشینهای بخار، برپایهٔ اصول نظری ممکن باشد به‌جای یک نمودار واقعی از نوعی نمودار مجازی بسیار ساده و نزدیک بدان استفاده می‌کنند.»

این اظهار نظر چهار حکم را شامل می‌شود:

۱. فشار بخار، هنگام ورود به ماشین ثابت می‌ماند؛
۲. خم دتانت است. وی می‌گوید: «در نمودارهای واقعی، این خم به‌شکلهای گوناگونی ارائه می‌شود که بستگی به انتقال گرما به بخار، کش رفتن آن و علتهای دیگر دارد. ویلیام رنکین می‌پذیرد که در ماشینی که عاری از پوشهٔ بخاری است یک دتانت بیدررو (آدیاباتیک) حکمفرماست؛ و در حالت معکوس «گمان می‌برند که گرمایی که بوسیله . . . پوشهٔ بخار انتقال یافته و در سیلندر دستخوش دتانت می‌شود برای جلوگیری از هر میعانی دقیقاً کافی است»».
۳. در فشار ثابت فرار گرما وجود دارد.
۴. مرز نمودار با محور فشارها یکی می‌شود و این امر در واقع مربوط به یک ماشین مجازی است که رفت ندارد و بنابراین تراکم ایجاد نمی‌کند. (این مفاهیم رفت و تراکم در فصل بعدی تعریف می‌شوند.)

---

۱. Hirn گوستاو آدولف ۱۸۱۵ـ۱۸۹۰ دانشمند فرانسوی ترمودینامیک و فیزیک.



شکل ۱۹.نمودار سیکل رنکین.
در محور طولها: حجم؛ در محور عرضها: فشار.
۱) AC طول حرکت‌دهنده: AB ورود بخار،BC دتانت؛ ۲) CD طول مقاوم، فرار

نویسنده سیکلی را برمی‌گزیند که نموداری محدود به سه خط مستقیم و خم دتانت (شکل ۱۹) آن را نشان می‌دهد. به‌طورکلی ما با شمایی سروکار داریم که گرچه قطعاً سازگار است در مقایسه با کار یک ماشین بخار پیستوندار، بسیار مجازی است. نمودار رنکین برای مهندسان توربین بیشتر سودمند می‌افتد.

در مورد خم دتانت، تنها بخش نمودارکه رنکین نتوانست آن را مستقیم سازد، در آن زمان چه می‌توانستند بگویند؟ در این‌باره باید به بیان دقایقی پرداخت. به کمک مفاهیم تازه‌ای که از نظریهٔ مکانیکی گرما استنتاج شده بودند: برابری کار و گرما، مفاهیم کار درونی، کار بیرونی و . . . اندیشهٔ درست‌تری از دتانت بخار یا به زبان دیگر، از سیال گازی نزدیک به میعان، پدید آمد. سه حالت را می‌شد از یکدیگر تمیز داد که دوتای نخست، نظریهٔ محض بودند. آنها را رنکین در مادهٔ دوم احکام خود که در بالا آورده شدند بیان کرده است؛ حالت سوم، تنها حالت واقعی است و همان حالتی است که همواره نشانگر ماشین پیستوندار ارائه داده است. اما خواهیم دید که این نوع دتانت، طبیعتاً یک ضریب آزادی دارد که نظریه‌پردازان نمی‌توانند آن را در محاسبات خود بگنجانند.

چنانچه فرض کنیم وزن معینی از بخار اشباع در محفظه‌ای داریم می‌توان تصور کرد که این بخار متحمل یک دتانت بیدررو شده است، یعنی هیچ نوع تبادل گرما ایجاد نمی‌کند. در این حالت، مقدار گرمای محتوی بخار، تنها برابر مقدار کار مکانیکی انجام شده، کم می‌شود. اما میعان جزئی هم وجود داشته است و بخشی از بخار مایع شده است تا مقدارگرمایی برابر با کار انجام شده بیرون دهد. حالت اشباع حفظ شده است. یک دتانت بیدررو از نظر مادی نمی‌تواند ایجاد شود.

حالت دوم می‌گوید: همان‌طورکه آقای رنکین پیش از این گفته است. فرض می‌کنیم که در هنگام

دتانت، مقداری گرما درست کافی برای اینکه هیچ میعان ایجاد نشود و به بخار داده شود. چنین حالتی را دتانت با جرم ثابت اصطلاح کرده‌اند. وزن بخار موجود در سیلندر در جریان چنین کاری واقعاً بدون تغییر می‌ماند. اما چگونه می‌توان در یک سیلندر واقعی، مقدار کاملاً معینی گرما وارد کرد؟ بنابراین هر دو حالت پیش گفته، مجازی هستند و تنها برای سهولت استدلال طرح شده‌اند.

سرانجام، به حالت سوم، که واقعی است می‌رسیم. بخار در جریان دتانت مقدار نامعینی گرما دریافت می‌کند که همواره بیش از مقدار گرمای کافی برای جلوگیری از میعان است. این مقدار گرما از چندین راه وارد آن می‌شود. به‌طورکلی از جدار سیلندر گرفته می‌شود، بعدها آن را شرح خواهیم داد. در چنین حالتی دتانت بیش از پیش به حالت گاز کامل نزدیک می‌شود، یعنی دتانت در دمای ثابت خواهد داشت («هذلولی»، اصطلاحی که در آن زمان معمول بود) و با قانون ماریوت سازگار است. بدین جهت، بر روی نشانگر شکلهایی پیدا می‌شود که تا مدتی این تصور را القا می‌کردند که برای بررسی مشکلات دتانت بخار آب، کافی است که قوانین گی‌لوساک و ماریوت را با یکدیگر ترکیب کرد.

در واقع شباهت قانون این حالت سوم دتانت با قانون ماریوت، صرفاً صوری است. برای اینکه گازی طبق قانون ماریوت دتانت یابد، چون دمای آن باید ثابت بماند، تنها کافی است که مقداری گرما برابر کار خارجی بدان داده شود. زمانی‌که بخار مطرح می‌شود دما پایین می‌آید و مقدار گرمایی که باید به سیلندر افزوده شود، همان‌طورکه دیدیم، بیشتر از گرمای هم‌ارز با کار خارجی است.

در پایان اضافه می‌کنیم که برای اینکه باز هم مسائل غامضتر شوند، خم نمودارها، چنانچه با شکلی که ما آن را شرح دادیم مزدوج شود به‌طورکلی بیش از مقدار معمول را نشان خواهد داد، این امر اشاره دارد به اینکه در سیلندر، به‌هنگام دتانت، فشار بیش از حد مورد انتظار است. کلید این رمز همان‌طورکه خواهیم دید، این است که تجدید تبخیر می‌شود، اما در آن زمان این را در نظر نمی‌گرفتند.

کوتاه سخن اینکه ما دیدیم که در اواسط این سده و حتی کمی پس از آن‌هم، ماشین بخار قربانی یک بحران شد. ظریف شدن بررسیهای نظری که در این زمان رسم شده بود هیچ راه‌حلی به‌دست نداد. سرانجام راه‌حل پیدا شد اما برپایهٔ بررسیهای تجربی بود. این ادعا آن‌قدر درست است که برای نامگذاری آیین تازه نام نظریهٔ تجربی جعل شد. این نظریه اساساً کار هیرن بود و می‌توان تاریخ ۱۸۷۶ را به‌عنوان تاریخ قطعی بدان نسبت داد. تنها چیزی که مانده است چگونگی به‌دست آمدن آن راه‌حل است.

نظریهٔ تجربی، پیشگامان: پدیده‌هایی که رفته‌رفته پایهٔ نظریهٔ تجربی ماشینهای بخار شدند از زمانهای بسیار دور شناخته شده بودند. اما در عوض می‌بایست سالهای زیادی را پشت‌سر گذارد تا اینکه این نظریه‌ها اهمیت کافی یابند. در سال ۱۸۴۱ لئونس توماکه پرفسور اکول سانترال بود و نیز کامی لورنس صنعتگر با یکدیگر مقاله‌ای جهت اثبات مفید بودن پوشه‌های بخار انتشار دادند. در آن زمان گرایش کلی به رها کردن آنها بود و تنها ماشینهای وولف و نیز ماشینهای کورنوال از آن استفاده می‌کردند. آقایان توما و لورنس که در سراسر زندگی همچون شریک با یکدیگر کار می‌کردند با تجربهٔ خود نشان دادند که پوشهٔ بخار سبب کاربرد بهتر گرما می‌شود. برحسب اتفاق آنها روند تغییرات فازهای فرعی را در سیلندری که به تناوب با دیگ بخار و محیط فرار آن (کندانسور یا هوا) ـ که دماهای بسیار نابرابری دارند ـ ارتباط دارد بادرستی و دقت تشریح کرده بودند. همان‌طورکه آنان ادعا کردند، این روند قبل از همه با میعان بخار در لحظه ورود به ماشین، سپس تبخیر دوبارهٔ آن در لحظهٔ فرار بخار مشخص می‌شود.

آقایان توما و لورنس به پشتوانهٔ تعبیر خود ازاین روند اظهار می‌داشتند که این پدیده در ماشینهای بخار با سیلندر شیشه‌ای، که برای نمایش ساخته شده بودند و در آن زمان در بسیاری از آزمایشگاه‌های فیزیک وجود داشت، کاملاً قابل رؤیت است. آقای اوژن بوردون که به‌عنوان مخترع فشارسنج فلزی شهرت بسیار داشت، در سالهای ۱۸۳۳ ـ ۱۸۳۴ ساخت چنین ماشینهایی را شروع کرده بود. بعدها، در آغاز سدهٔ بیستم آقای آناتول ماله که شاگرد لئونس توما در اکول سانترال بود به یاد می‌آورد که در یکی از این نمایشهای ماشین بخار با سیلندر شیشه‌ای شرکت داشته است.

دو سال پس از آن، در ۱۸۴۳ آقای شارل کومب بنوبهٔ خود دربارهٔ مزایای پوشهٔ بخار، دو نامه به آکادمی علوم پاریس تسلیم کرد. در این نامه‌ها تحلیلی از تأثیر جدار وجود داشت که مشابه نظرهای آقایان توما و لورنس بود. در این نامه‌ها ما با گزارش مشروحی از آزمایشهایی روبه‌رو می‌شویم که روی ماشین فارکو انجام گرفته بود. درحالی‌که گزارش دو نویسنده قبلی بسیار مبهم بود. آیا بدین علت بود که آقای کومب خود را ملزم به گزارش بررسیهایش ندیده است؟ قطعی است که وی با آنان در تماس بوده، زیرا از توما نام می‌برد.

این نخستین روایت، عمر چندانی نکرد. اکنون باید ببینیم که چگونه نظریهٔ تجربی در دستهای آقای هیرن جان گرفت، کاری که بویژه مرهون بررسیهای جالبی است که نه آقای توما و لورنس و نه حتی کومب در آن نقشی نداشتند. برای اینکه زنجیرهٔ حوادث بهتر درک شود باید کلیاتی از کار هیرن ارائه داد.

کار هیرن: گوستاو آدولف هیرن در سال ۱۸۱۵ در لوگلباخ در حوالی کولمار زاده شد. تربیت اولیهٔ وی کمتر کلاسیک، و گویا بخشی از آن بدون معلم بوده است. همان‌طورکه غالباً در چنین مواردی اتفاق می‌افتد دربارهٔ هرچیزی که با آن برخورد می‌کرد با علاقه زیاد می‌اندیشید. وی کار خود را به‌عنوان شیمی‌دان در یک کارگاه قدیمی نساجی به نام هاوسمان ـ یوردان[1] در لوگلباخ شروع کرد. این کارگاه در سال ۱۷۷۲ تأسیس شده بود. پدر وی قبلاً در این کارگاه به‌عنوان طراح ترکیب‌کننده کارکرده بود و با دختر مالک کارخانه ازدواج کرده و شریک کارخانه شده بود. در سال ۱۸۴۲ آقای گوستاو آدولف به بخش ماشین‌آلات کارگاه انتقال یافت. بعدها همراه با برادر خود، فردینان مالک این کارگاه شد. آقای فردینان مخترع انتقال نیروی محرکه از راه کابل دینامیک یا انتقال «تلودینامیک»[2] بود، شیوه‌ای که اکنون تله دینامیک گفته می‌شود. هیرن نبایستی هیچ‌گاه، حتی پس از جنگ ۱۸۷۰ میهن خود را ترک گفته باشد. فردینان گویا در سال ۱۸۷۹ فوت کرد و شرکت منحل شد و هیرن به کولمار بازگشت و در سال ۱۸۹۰ در آنجا بمرد.

ماشین بخاری که وی از سال ۱۸۴۲ مسؤولیتش را داشت و با آزمایشهایی که روی آن به‌عمل آورد. شهرتی به‌هم رسانید از نوع ماشین وولف بود که کارخانهٔ اشتهلین ـ هوبرت، یکی از ماشین‌سازان زبردست آلزاسی، ساکن بیشویلر در سال ۱۸۲۶ آن را تهیه کرده بود. در سالهای ۱۸۴۰ـ۱۸۴۵ این ماشین به‌عنوان یک ماشین ۳۶ اسب، با دیگی که فشار کاری آن سه اتمسفر بود فهرست شده بود. احتمالاً این قدرت به اسب اسمی محاسبه شده بود زیرا بعدها از آن با عنوان ماشین ۷۰ اسب صحبت می‌شد. می‌توان مطمئن بود که هر دو سیلندر آن را پوشه‌ای از بخار زنده در خود می‌گرفت. بدون تردید در سال ۱۸۲۶ اشتهلین از این اصل، که وولف با تمام نیرو از آن پشتیبانی می‌کرد و آقای ادواردز نیز در سال ۱۸۱۵ در شایو، ایمان خود را بدان ابراز داشته بود، تخطی نکرد. بعدها خواهیم دید که چگونه آقای هیرن در این ماشین بنابر مقتضیات آزمایشهای خود، تغییری بنیادی داد. در این کارگاه همچنین یک ماشین کم فشار که مؤسسه وات ـ بولتون در سال ۱۸۲۷ ساخته بود وجود داشت؛ و نیز یک ماشین کوچک کمکی، که اشتهلین ـ هوبرت تهیه کرده بود. اما ماشینهای اخیر گویا در آزمایشهای هیرن به‌کار گرفته نشدند.

انگیزهٔ بررسیهای هیرن عمل صنعتی بود. این بررسیها تنها پس از کندوکاوهای خستگی‌ناپذیر فکری همراه با کار خستگی‌ناپذیر ببار نشستند.

کارهای اولیه؛ بررسیهای اصطکاک: در سال ۱۸۵۴ آقای هیرن دربارهٔ اصطکاک و روغنکاری جزوه‌ای انتشار داد که پیوستی دربارهٔ «قانون تولید کالریک در اصطکاکها» با آن بود. نامه‌ای همراه

1. Haussmann-Jordan 2. telodynamique

داشت که در آن پیشنهاد می‌کرد که آزمایشهایی در مورد پوشه‌های بخاری به‌عمل آید تا فواید آنها بازشناخته شود. ما در اینجا باشارل کومب روبه‌رو می‌شویم، زیرا از آقای هیرن، که استنتاجاتش دربارهٔ اصطکاک در ابتدا با مخالفت شدید برخورد کرده بود دفاع می‌کرد. هیرن به چشم یک دوست و استاد به کومب می‌نگریست و بعدها خاطرنشان ساخت که از آغاز تحقیقاتش، نوشته‌های سال ۱۸۴۳ راکه در بالا مطرح شدند در دست داشته است. آقای هیرن از همان نخستین بررسیهای خود به‌نظریهٔ مکانیکی گرما، که در آن زمان جدید و مورد بحث و مناظره بود، پیوست.

بررسیهای وی سبب شد که برای هم‌ارز مکانیکی، مقداری دقیق‌تر از آنچه مایر گفته بود پیشنهاد شود. پیشنهاد وی گرچه تاریخ ۱۸۴۲ را با خود داشت، تردیدی نیست که او تنها با یادداشتهایی که ژول طی آنها آزمایشهای معروف خود را شرح داده بود، آشنا بود.

سالهای ۱۸۵۵ـ۱۸۵۸ پوشه، بخار داغ: در سالهای ۱۸۵۵ ـ ۱۸۵۶ هیرن نظر خود را دربارهٔ مفید بودن پوشهٔ بخاری انتشار داد. اما وی در همان سال ۱۸۵۵، که آزمایشهایش بتازگی پایان یافته بود، در ماشین لوگلباخ تغییری بنیادی ایجاد کرد و آن را به یک ماشین تک سیلندری بدون پوشه تغییر شکل داد، که ابعاد سیلندر آن ۶۰۰ × ۱۷۱۰ میلیمتر بودند و چهارکشو، بخار را توزیع می‌کردند؛ مانند ماشینهای کورلیس که بعدها ساخته شد. بالاخره و بخصوص وی یک داغ‌کنندهٔ بخار، که همان سال به ثبت رسانیده بود در آن کار گذاشت. این ماشین حدود سی سال با بخار داغ کار می‌کرد. این تغییرات قدرت ماشین را تا ۱۱۸ اسب واقعی بالا برد، آزمایشهای با لگام پرونی چندین بار این رقم را تأیید کردند.

هیرن به کمک این ماشین تازه توانست در سالهای ۱۸۵۷ ـ ۱۸۵۸ بررسیهای تازه‌ای دربارهٔ مسألهٔ بخار داغ به‌عمل آورد.

لحظه‌ای روی نتیجه این کارها مکث می‌کنیم. نه پوشه‌های بخاری و نه داغ بودن بخار هنوز مکانیسمی راکه برپایهٔ نظریهٔ تجربی استوار باشد نداشتند؛ چیزی که باید به آن می‌رسیدند و هنوز بیست سالی از آن فاصله داشتند. آزمایشها گوناگون بودند. آقای هیرن همواره به کارهای خود با دید ترمودینامیک کاربردی می‌نگریست. در یک کلمه می‌توان گفت او افقهای دورتر از ماشین بخار را در نظر داشت، گرچه ماشین بخار، بخش صنعتی کار او بود که در پایان بیشترین اهمیت را داشت.

اما تا آن زمان هرگز در یک ماشین گرمایی نشان نداده بودند که بخشی از گرما هم‌ارز کار تولید شده ناپدید می‌شود. می‌دانستند که کارنو در کتاب خود *Reflexions* و پس از وی کلاپیرون توجه

داده بودند که گرما کاری جز جریان از یک دما به دمای دیگر، بدون اینکه از مقدار آن کاسته شود، نمی‌کند.

با پذیرش نظریهٔ مکانیکی گرما، کاری که هیرن انجام داد، نظریهٔ بالا رد می‌شد.

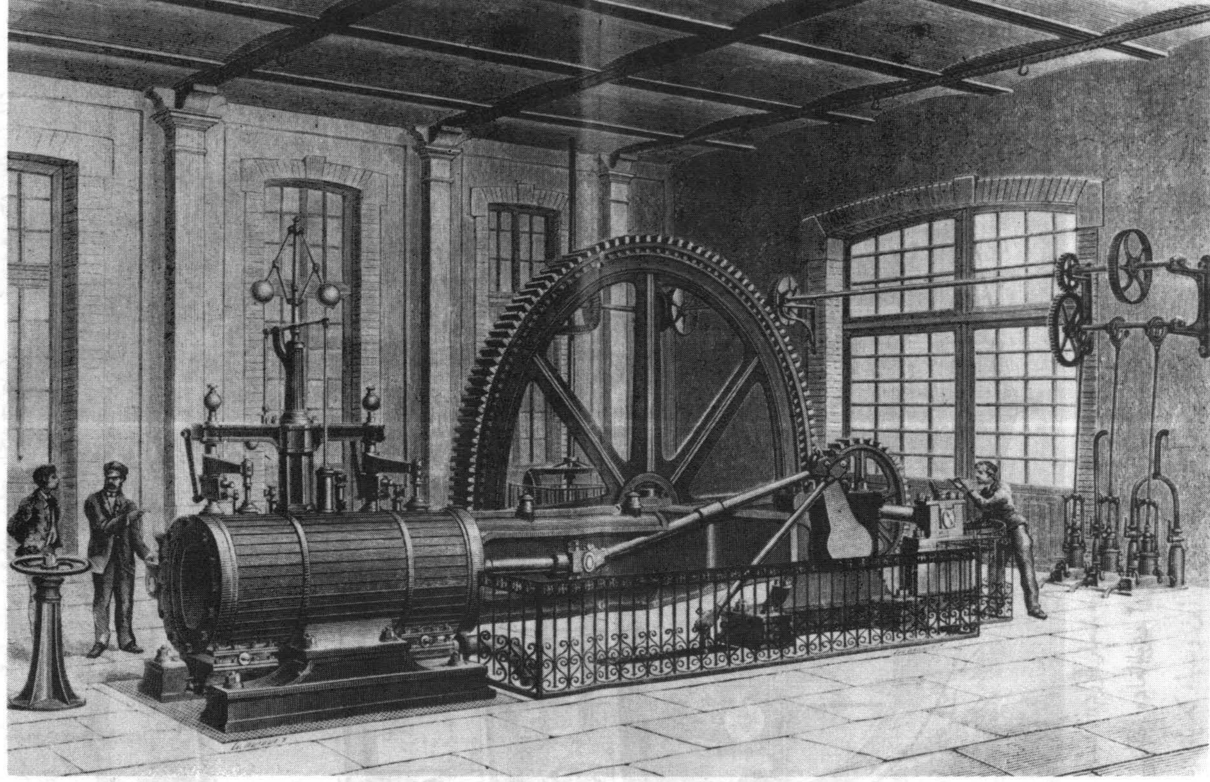
نتایج تجربی در آغاز فریبنده بودند؛ حتی گاهی تولید کار همراه با پیدایش گرما جلوه‌گر می‌شد! در واقع چون مقدار گرمایی که در یک ماشین صنعتی به‌کار تبدیل شده بود دربرابر تعداد زیاد کالریهایی که در اجاق ایجاد کرده بودند بسیار کم بود هیچ توقعی از این کار نمی‌رفت. آقای هیرن، چنانچه کلاوزیوس از وی بشدت پشتیبانی نمی‌کرد به‌علت رقابت سختی که آکادمی برلن در سال ۱۸۵۷ ایجاد کرده بود قطعاً بررسیهای خود را رها می‌کرد. در حساب آخر، ناپدید شدن مقداری گرمای متناسب با کار تولید شده از حالت شک و گمان خارج شد. وانگهی هیرن توانست نخستین کار تجربی مربوط به میعان در جریان دتانت را نشان دهد، کاری که آقای کلاوزیوس و رنکین آن را پیش‌بینی کرده بودند و درگذشته از آن سخن راندیم. درباره تأثیر جدار نیز نقش آن ندیده گرفته نشد، اما هنوز اهمیت لازم را به آن نمی‌دادند.

آقای هیرن در سال ۱۸۶۲ نخستین چاپ کتاب خود را دربارهٔ نظریهٔ مکانیکی گرما بیرون داد. سه سال پس از آن، در سال ۱۸۶۵ چاپ دیگری ازکتاب وی منتشر شد. با مقایسه این دو چاپ، احساس می‌شود که مسألهٔ تأثیر جدار، روزبه‌روز بیشتر فکر این مهندس آلزاسی را به خود مشغول داشته بود.

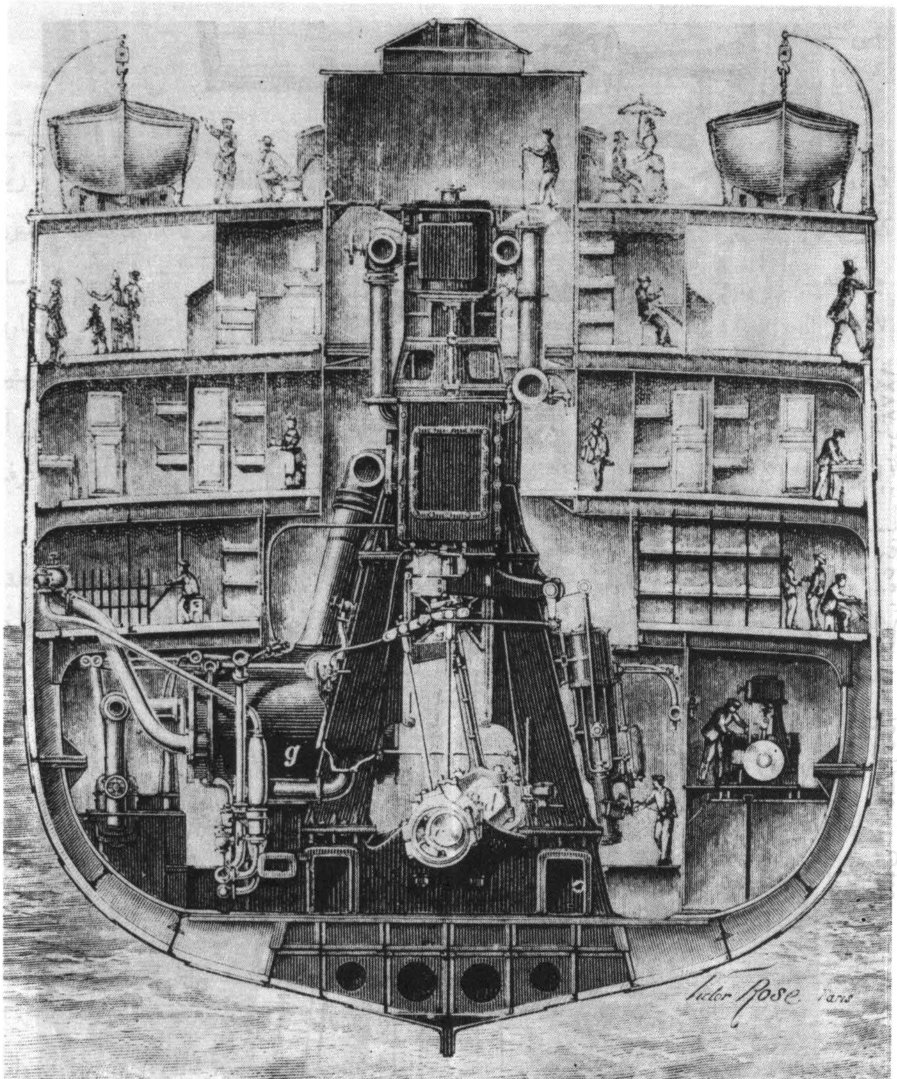
سالهای ۱۸۶۷ـ۱۸۸۰ مسألهٔ آب همراه: در سال ۱۸۶۷ هیرن با همکاری آقای لولوتر[1] به رشته آزمایشهای تازه‌ای روی ماشین لوگلباخ دست زد. مسألهٔ اصلی این بررسیها شناخت بهتر تأثیر داغ کردن بخار بود. لولوتر نخستین نامی بود که شهرت یافت، اما چند نفر دیگر هم با آقای هیرن همکاری داشتند. آقای هیرن در پرتو بدیع بودن روشش و بدون شک شخصیت جالبی که داشت توانست رفقای بسیار صمیمی در اطراف خود گرد آورد. این، توفیقی بسیار پرارزش بود زیرا درغیراین‌صورت نمی‌توانست بررسیهایی را که باید بدقت بسیار زیاد و هزاران بار و همراه با محاسبات جانفرسا انجام گیرند به پایان برساند. آقای هیرن همچنین ناگزیر شد برای رفع نیازهای کارش، نه‌تنها نشانگر وات بلکه سطح‌یاب امسلر و حتی آریتمومتر[2] هموطن خود توماس کولمار را تکمیل کند.

درکارهای سال ۱۸۶۷ تأثیر جدار به‌شکل بسیار مشخصتری مورد بحث قرار گرفت. چندی بعد، هیرن آقای لولوتر راکه در این راه گام برمی‌داشت مورد لطف قرار داد. تأثیر این همکار بر استاد ظاهراً در این زمان قطعی بود. وانگهی تا آن زمان به‌طورکلی رسم بد اندازه‌گیری مصرف ماشین

1. Leloutre 2. arithmométre



تابلوی ۳. ماشین بخار ۱۰۰ اسبی، نوع کورلیس، حدود ۱۸۷۸.



تابلوی ۴. ماشین بخار هاونی کشتی باری شامپانی، حدود ۱۸۸۵.

بخار براساس کیلوگرم زغال برای هر اسب در هر ساعت، هنوز معمول بود. هیرن در مخالفت با این رسم نشان داد که باید مصرف را در برابر کیلوگرم بخار تولید شده در نظر گرفت. روشن است که طی یکی دو روز مباحثه پایان نیافت و بدرستی نمی‌دانستند که این عادات در چه فاصلهٔ زمانی تغییر خواهند کرد: شاید در سایهٔ پذیرش نظریه تجربی در آینده!

در آن زمان ماشینی را خوب می‌دانستند که برای هر اسب در یک ساعت دو کیلوگرم زغال مصرف کند درحالی‌که بازده دیگهای بخار این دوران، ۱۴ کیلوگرم بخار برای یک اسب در هر ساعت بود. ماشین لوگلباخ استثنائاً به‌عنوان ماشین خوب شناخته شد زیرا ۹ کیلوگرم بخار برای یک اسب در هر ساعت بازده داشت.

آیا باید اثر جدار را مسؤول اصلی اتلاف زیادی دانست که درکار ماشینهای بخار وجود داشت؟ در پاسخ به این پرسش پیش از اینکه در مطالعات کالری‌سنجی برای اثبات احتمالی آن غرق شویم باید مسأله آب همراه را که تا آن زمان گشوده نشده بود رفع و رجوع کرد. سالیان زیادی Société industrielle de Malhouse این موضوع را به رقابتی تقریباً همیشگی گذاشته بود و هیچ‌گاه جایزهٔ آن پرداخته نشد. آقای هیرن با این مسأله درگیر شد و در رساله‌ای که در ۱۸۶۹ انتشار داد سرانجام راهی برای اندازه‌گیری مقدار آب همراه پیشنهاد کرد. وی نشان داد که آب همراه وجود دارد، اما دربارهٔ مقدار آن غلو بسیار شده است. وانگهی آزمایشها نشان می‌دادند که مقدار این اتلاف را می‌توان قابل توجه دانست درحالی‌که طی اندازه‌گیریها مقدار آب همراه برابر هیچ به‌دست آمده بود. یک دماسنج مقایسه‌ای با هوا که با کمک هالوئر[1]، یک همکار جوان دیگر هیرن ساخته شده بود در این بررسیها وسیلهٔ با ارزشی بود.

سالهای ۱۸۷۳ـ۱۸۷۷ مرحلهٔ قطعی: مرحلهٔ قطعی، یک دورهٔ پنج ساله ۱۸۷۳ ـ ۱۸۷۷ را دربر می‌گیرد. در سالهای ۱۸۷۳ و ۱۸۷۵ آقایان هیرن و هالوئر و همکار دیگر آنها آقای پوپاردن[2] دو رشتهٔ طولانی آزمایش انجام دادند و نتایج آنها در ۱۸۷۷ منتشر شدند. در این حین در سال ۱۸۷۶ آقای هیرن تحریر سومی از نظریهٔ خود انتشار داد که در آن بر روی مسأله تأثیر جدار نموهای بسط یافته مکثی نکرده بود و این رفتار «با همه صراحت مطلوب» انجام گرفته بود. مؤلف می‌نویسد: «همهٔ نظریهٔ ما قبل تجربی را برای ماشین بخار باید ناممکن به‌شمار آورد». همچنین باید خاطرنشان ساخت که آقای هیرن در سال ۱۸۷۳ یک وسیلهٔ اندازه‌گیری فوق‌العاده جالبی ساخته بود تا در اندازه‌گیری کار مؤثر ماشین، به‌جای لگام پرونی آن را به‌کار برد. این وسیله که پان‌دینامومتر[3] خمش نام داشت. تنها می‌توانست تغییر شکل قطعه‌ای را اندازه بگیرد که کار مورد نظر را منتقل

1. Hallouer 2. poupardin 3. Pandynamomètre

می‌کرد در حوزهٔ کار شاهنگ ماشین لوگلباخ بود. با این وسیله آزمایشهای بسیار دقیقی انجام گرفت و بدون اینکه مزاحم کار روزمره کارخانه شوند آن را به‌کار می‌گرفتند.

نظریهٔ تجربی در سال ۱۸۷۷ به‌طور قطعی پذیرفته شد. یک نفر بلژیکی به نام دولش‌اوورس دری[1] در آن زمان به این به‌اصطلاح «هفت برادران مولوزی» پیوست. رشته مقالاتی که وی در سالهای ۱۸۷۸ ـ ۱۸۸۰ در Revue Universelle انتشار داد این نظریهٔ جدید را به‌طور قطع افشا کرد. هالوئز نیز تا سال ۱۸۸۲ آزمایشهای خود را بر روی ماشینهای گوناگون ادامه داد. این آزمایشها همهٔ نتایج پیشین را تأیید کردند. در سال ۱۸۷۹ شرکت صنعتی مولوز برای آقای هیرن جایزه‌ای مقرر داشت که به مدت ۱۰ سال سالانه ۱۰۰۰۰ فرانک از حساب امیل دولفوس[2] به وی پرداخت شود.

پایان کار هیرن: نام تسئونر[3] هنوز هم پرآوازه است. این مؤلف *traité des distributions Par tiroirs* شهرت خود را بویژه مرهون ابداع نقشهٔ اجرایی در مختصات قطبی است که تهیهٔ طرح مناسب برای کشو را ممکن می‌ساخت، هرچند احتمال می‌رود که این نوع نقشه اجرایی در انتشارات پیش از وی وجود داشته است. به‌هرتقدیر، آقای تسئونر با هیرن روابط دوستانه داشته است. آقای هیرن از اینکه آخرین استنباطات وی با سهولت و شدت از سوی تسئونر رد شده‌اند و اثر جدار را نوعی افسانه دانسته است بسیار غافلگیر شد. وی به‌جای آن، سیستم پیچیده و مطمئناً بر خطایی را با دخالت دادن حضور مستمر مقداری آب مایع شده در سیلندر پیشنهاد می‌کرد. این مورد، هم مانند آب همراه وجود دارد اما تأثیر آن بسیار کمتر از آن است که تصور می‌کنند. می‌توان پرسید که آیا ناراحتی تسئونر از اینکه نخستین کسی که این راه‌حل ساده و منطقی را پس از تفکر لازم یافته است نه خود وی بلکه استاد آلزاسی او بود انگیزهٔ چنین اظهاراتی نیست؟ در سالهای ۱۸۸۱ و ۱۸۸۲ بین آنان بحث بسیار شدیدی درگرفت اما هر دو در مواضع خود پافشاری کردند. در واقع از ۱۸۸۰ ـ ۱۸۹۵، بنابر آنچه که از خواندن نوشته موریس دمولن برمی‌آید، نظریهٔ تجربی بیش از پیش بررسی و سرانجام به‌طور کامل پذیرفته شد زیرا درک رضایتبخشی به مهندسان می‌داد. در پایان به توضیح کاملی دست یافتند بویژه اینکه این نظریه پیش‌بینی اصلاحاتی را که مدتها پیش از روی غریزه انجام گرفته شده بودند ـ اما ترمودینامیک به‌طور بسیار نارسایی دربارهٔ آنها می‌اندیشید ـ ، ممکن ساخت: انبساط چندگانه، پوشهٔ بخاری، داغ کردن بخار.

انتقادهای تسئونر آقای هیرن را بسیار تحت تأثیر قرار داد، وی در سال ۱۸۸۰ بازنشسته شد. مرگ دهشتناک هالوئز که دربرابر انتقادها پشتیبان وی بود اندوه عمیقی در او پدید آورد. این استاد

1. Dwelshauvers-Dery 2. E. Dollfus 3. Teuner

سالخورده از اینکه در سال ۱۸۸۸ یک نفر انگلیس به نام براین ـ دانکین[1] وسیله‌ای را به وی نشان داد که خود آن را آشکارکننده نامیده بود و جریانهای متناوب میعان و تبخیر را که نتیجهٔ اثر جدار بود بخوبی نشان می‌داد بسیار خرسند شد. ما درگذشته از ماشینهای شیشه‌ای اُوژن بوردون صحبت کرده‌ایم. این بار کار روی ماشینهای واقعی بود زیرا ابزار آشکارکننده به همان شکل نشانگر وات روی سیلندر دستگاه سوار می‌شد. این ابزار از دو لولهٔ شیشه‌ای هم‌مرکز به‌طوری ساخته شده بود که مانع هرگونه تبادل گرمایی با هوای محیط می‌شد. پدیده‌ها با وضوح مطلوبی از جدار لولهٔ داخلی دیده می‌شدند.

در سال ۱۸۹۰، سال مرگ آقای هیرن، براین دانکن طوری ابزار آشکارکنندهٔ خود را تغییر داد تا بتوان از آن به‌عنوان گرماسنج استفاده برد، همه این تغییرات، نظریهٔ موجود را تأیید می‌کردند.

باید چند کلمه‌ای هم دربارهٔ شخصیت شگفت‌انگیز آقای هیرن سخن گفت، گرچه در خلال صفحات قبل قدری از شخصیت وی آشکار شده است. هرچند که آقای هیرن بسیار اجتماعی و خوش‌برخورد بود وگویا همیشه احترام عمومی و قطعی اکثر اطرافیان را نسبت به خود برمی‌انگیخت، با وجود طبیعت جدی کارهایش باید گفت وی روحیهٔ مذهبی کمی کودکانه داشته است. او نظریهٔ تجربی را تقریباً بناچار ـ نه از روی میل و رغبت ـ پایه گذارد و این بیشتر بقصد اثبات اندیشه‌های خرافی به کمک فیزیک گرما بوده است و خوشبختانه در این‌باره هیچ‌چیزی محو نشد و وی آن را در تعدادی از انتشارات خود ارائه داده است در این مورد با نوعی اتحاد عجیب واژه‌ها نوعی «متافیزیک تجربی» را تبلیغ کرده است. همین‌طور می‌توان گفت که وی بموقع مرد زیرا چنانچه بیشتر می‌زیست همان خطایی را مرتکب می‌شد که برتلو نسبت به اتم مرتکب شده بود ـ گرچه به‌علتی کاملاً متضاد با آن. در واقع، وی در اواخر زندگی خود نظریهٔ جنبشی گازها را همچون نظریه‌ای شیطانی رد کرده بود چون در آن مولکولها با یکدیگر تماس مادی داشتند. چنین می‌نماید که تنها نوعی تأثیر از دور همراه با یک مشرب فلسفی روح‌گرایانه را در این‌باره می‌پذیرفت! هیرن خوشبختانه در ریاضی بیش از متافیزیک دست داشت و مکانیک اجرام سماوی مشغله ساعتهای بیکاری وی بود. او بدون اینکه از کارهای ماکسول آگاه باشد با تأخیر بسیار، این فرضیه را که حلقه‌های کیوان (زحل) نمی‌توانند جامد یا مایع و نه گاز باشند و از ترکیب ذرات ریز جامد و منزوی از یکدیگر تشکیل شده‌اند، از نو کشف کرد.

چرخه‌ای که تحت تأثیر جدار است: اما ببینیم چرخه‌ای که تحت تأثیر جدار قرار دارد، آن‌طورکه مجموعهٔ مهندسان در حدود سال ۱۸۹۵ آن را پذیرفته بودند، چگونه است. طرح کلی پدیده‌ها،

1. Bryan-Donkin

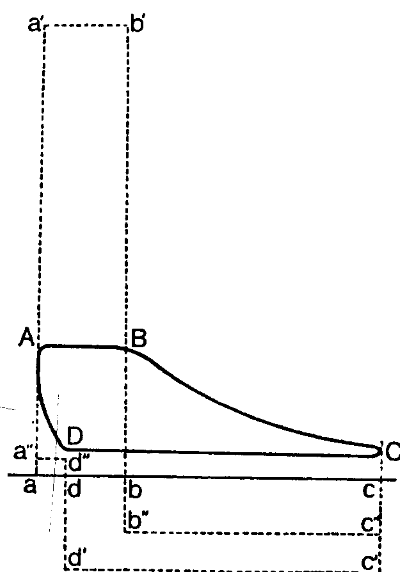
بدانگونه که در سالهای ۱۸۴۱ ـ ۱۸۴۳ پیشنهاد شده بود باقی ماند. با این تفاوت که گفته شد اندازهٔ گرمای مؤثر، مقدار مهمی است و تبادلهای گرمایی با سرعت بسیار زیاد انجام می‌گیرند. گرچه اثر جدار متناظر با افزایش سرعت کاسته می‌شود به‌طوری‌که به‌حساب آوردن آن آسان است، ماشینهای پیستوندار بخار هرگز دارای سرعتی نخواهند بود که بتوانند اثر جدار را مجزا سازند.

اما به فازهای این چرخه بازگردیم، در فاز ورود، بخاری که از دیگ می‌آید با جدار ماشین، که دمای محیط فرار بخار، یا به‌عبارت دقیقتر، همان‌طورکه تجربه نشان می‌دهد، در اثر تراکم، دمایی کمی گرمتر از آن را دارد، برخورد می‌کند. در اینجا پدیدهٔ نخست میعان اولیه اتفاق می‌افتد. طی تمام مدت ورود بخار، جدار ماشین بوسیله بخار گرم می‌شود.

زمانی‌که دتانت شروع می‌شود، فشار پایین می‌آید و آبی که قبلاً تشکیل شده است به‌حساب گرمایی که جدار ماشین در هنگام ورود بخار گرفته است بشدت غلیان می‌کند. در این مرحله، پدیده می‌تواند سه رفتار متفاوت داشته باشد: ۱) همهٔ آب، طی رفت پیستون بتدریج بخار می‌شوند و در اواخر رفت پیستون، جدار ماشین خشک شده است ـ و این بهترین حالت ممکن است! ۲) مقدار آب بیش از آن است که همهٔ آن تبخیر شود، در نتیجه در پایان رفت پیستون هم مقداری از آن روی جدار باقی خواهد ماند؛ ۳) مقدار آب کم است، بنابراین سریعاً تبخیر می‌شود. از سوی دیگر، پیستون که به پیش می‌رود به سطوحی بتدریج سردتر برخورد می‌کند و در پایان دتانت میعان تازه‌ای ایجاد می‌شود و در این حالت است که در پایان رفت پیستون آب مایع وجود دارد. دو حالت آخری، بویژه دومی، حالتهای بدی هستند.

در واقع به‌هنگام فرار بخار، چه اتفاقی می‌افتد؟ فشار یکباره افت می‌کند، چنانچه جدار ماشین خشک باشد مقداری گرما برای ایجاد تعادل گرمایی با کندانسور، نه بیشتر، از جدار دیگ منتقل می‌شود. اما چنانچه جدار مرطوب باشد آبی که اطراف آن است شروع به جوشیدن می‌کند و گرمای لازم برای تبخیر را از جدار می‌گیرد. آیا آقای هیرن این پدیده را سرد شدن درکندانسور نامیده است؟ این بزرگترین ریشهٔ همه آشفتگیهایی است که جدار در چرخه ایجاد می‌کند. خشک بودن فلز جدار و سیلندر در لحظهٔ شروع فرار است که کار ماشین را اقتصادی می‌کند. این نتیجهٔ مهمی است که کارهای آقای هیرن رسیدن بدان را ممکن ساخت و پیشگامان سالهای ۱۸۴۱ ـ ۱۸۴۳ تنها در حد شک بدان نزدیک شده بودند.

پس از پایان فرار، آخرین بخش مسیر برگشت، به‌طور عادی، در ماشینهای صنعتی، فاز کوتاه تراکم است. این فاز برخلاف قبلی، اگر با آرامش کامل انجام گیرد تا کار اضافی جذب نکند، به



شکل ۲۰.نمودار تبادلهای گرمایی در داخل سیلندر.
چهارگوشهای نقطه‌چین در بالای محور افقی حجمها، مقدار گرمایی را نشان می‌دهند که بخار به جدار منتقل می‌کند (محوطه‌های واقع در بالای محور طولها)؛همین چهارگوشهای در پایین محور طولها مربوط به‌مقدار گرماهایی است که جدار به بخار پس می‌دهد. چرخهٔ واقعی، که با چرخهٔ رنگین بویژه با داشتن تراکم نهایی در DA ممتاز است. در aba′b′ جدار با بخار ورودی گرم می‌شود. در bcb″c″ جدار به‌هنگام دتانت، بخار را گرم می‌کند. در cdc′d′ اتلاف گرما در کندانسور به‌هنگام فرار بخار، است. در ada″d″ جدار به‌هنگام تراکم بخار گرم می‌شود.

سود چرخه تمام می‌شود. در واقع تراکم سبب گرم شدن جدار می‌شود که کاهش میعان اولیه ضربهٔ بعدی را در پی دارد.

این وصف کلی کار است، آقای دولش‌اوورس دری نمودار بسیار جانداری از آن تهیه کرد و آن را بر نمودار نشانگر منطبق ساخت (شکل ۲۰)

مسائل حل شده ۱. داغی بخار: در زمانی‌که هنوز از خواص فیزیکی بخار اطلاع کاملی نداشتند در اندیشهٔ داغ کردن آن بودند. مگر نه اینکه پاپن القا می‌کرد که موتور برای هر ضربه، آهن سیلندرش تافته شود (طرح سال ۱۷۰۷)؟ در این‌باره اندیشهٔ صریحتری در سال ۱۷۹۶ به میان گذاشته شد،

زمانی‌که فیلیپ لوبون پیشنهاد کرد که «بخار آب را از لوله تافته شده‌ای بگذرانند تا انبساط بسیار زیادتری داشته باشد». کاربرد واژهٔ انبساط القا می‌کند که این مخترع فرانسوی نوعی انبساط با فشار ثابت را در نظر داشته است ـ که نظر درستی است؛ چنانچه منظور مخالف را داشت بدون تردید می‌نوشت: نیروی منبسط شده بسیار زیادتری.

بعدها کلمه داغ شدن در بسیاری از ثبت اختراعات، یا طرحهایی که احیاناً منجر به ساخت پیش‌نمونه شده است دیده می‌شود. در اینجا باید به دیگهای بخار تندجوش توجه خاصی داشت، زیرا وضع آنها طوری است که طبیعتاً بخارهای داغ می‌دهند. به همین دلیل است که آقای جیکوب پرکینز در چارچوب طرحهایش دربارهٔ ماشینهای بخار با فشار زیاد که با بخار یک دیگ تندجوش تغذیه می‌شد به این مسأله علاقه‌مند شد. وی حتی در آنالیز خواص بخار داغ مقدار زیادی به پیش رفت و در سال ۱۸۳۷ نوشته است که این بخار می‌تواند، بدون اینکه میعان یابد، مقداری کالریک از دست بدهد؛ برخلاف بخارهای اشباع شده که کمترین سقوط دما در آنها با میعانی برابر جبران می‌شود.

در فرانسه، آقایان توماس و لورنس در سال ۱۸۳۹ با تولید بخار داغ ۳۵۰ درجهٔ صد بخشی زغال حیوانی را احیا کردند. این کار یکی از نخستین نمونه‌های کاربرد این بخار بود؛ گرچه روشن است که این کار هیچ ربطی به نیروی حرکت‌دهنده نداشت.

در سال ۱۸۴۳ آقای جوزف گیل[1] انگلیسی نیز درکاربرد بخار داغ به مناسبت مقدار گرمای اضافی آن اندیشید. وی چرخه‌ای بدین‌ترتیب ارائه می‌دهد: میعان اولیه، تجدید تبخیر درکندانسور. بنابراین می‌توان وی را در ردیف توماس، لورنس و کومب از پیشگامان نظریهٔ تجربی دانست. متأسفانه، همان‌طورکه آقای تسئونر در چهل سال بعد ادعا می‌کرد، وی این پدیده‌ها را نه به اثر جدار، بلکه به حضور همیشگی آب مایع شده در سیلندر نسبت داد.

چند نمونهٔ بالا استثناهایی هستند که شایسته یادآوری می‌باشند. به‌طورکلی آنچه که کاربرد بخار داغ را پیشنهاد می‌کرد برای خشک‌سازی بخار و براساس افسانه‌ای بود که درگذشته آن را گوشزد کردیم و طبق آن آبهای همراه می‌توانستند تا چند ده درصد افزایش یابند.

در ماشینهای پیستوندار بخار تا چه اندازه از بخار داغ استفاده می‌شد؟ باید گفت که بسیار کم، زیرا مکانیسمها این نوع را بخوبی تحمل نمی‌کردند. نمی‌توانستند دمای بخار را خیلی زیاد بالا برند و از سوی دیگر، در لوله‌های باریک داغ کردن بخار، پدیده‌های تجزیهٔ آب ایجاد می‌شد که در نتیجهٔ آن قطعات اکسید آهن تشکیل می‌شدند که همراه آب بخار شده و قطعات مکانیکی را

1. Joseph Gill

خراب می‌کردند.

با این‌حال، از سال ۱۸۵۸ تا ۱۸۷۰ نوعی بخار داغ متوسط کاربردی تقریباً عمومی در موتورهای کشتیها دارای فشار متوسط ـ رایج در آن زمان ـ یافت. مزایای واقعی این روش، تحمل‌ناپذیری آهن ماشین را نادیده می‌گرفت، اما زمانی‌که انبساط دوگانه و وجود کندانسور در سطح عملی شد و نیز نیاز به کاربرد پوشهٔ بخاری و گرمسازی بخار میانه کار، رسیدن به نتایج مطلوب با ناراحتیهای کم را ممکن ساختند داغ کردن بخار کنار گذاشته شد.

کاربرد ماشینهای با بخار داغ در خشکی تقریباً هیچ بود. وجود ماشین لوگلباخ که به‌مدت چند ده سال با بخار داغ کار می‌کرد در این حکم خللی ایجاد نمی‌کند. محققاً این ماشین نوعی موتور کارخانه‌ای بوده است، اما در همان‌حال هم یک وسیلهٔ آزمایشی، که جهت انجام دادن آزمایشهای عملی ساخته شده بود.

در آخرین دهه سدهٔ نوزدهم، شاهد تجدید کاربرد بخار داغ در لوکوموتیوها، و نیز در زمین ـ اما در شرایطی کاملاً متفاوت می‌باشیم؛ زیرا دربارهٔ توربینها سخن می‌گوییم.

در قسمت لوکوموتیوها، ماشین بخار داغ اشمیت سر برآورد که در لوله‌هایی جا داشت؛ سال ۱۸۹۸ آغاز رواج عمومی این روش بود. ما بعداً در این‌باره در فرصت مربوط به تحول دیگهای بخار لوکوموتیو باز سخن خواهیم گفت. اما در سال ۱۸۴۰ آقای هاثورن، ماشین‌ساز پرآوازهٔ انگلیسی آن را پیشنهاد کرده بود. باید درک کرد که چرا برای لوکوموتیوها نوع بخار داغ بر نوع پوشهٔ بخاری ترجیح داده شد. مقدار گرمایی که یک پوشهٔ بخاری در دمای مشخص می‌تواند منتقل کند متناسب با سطح آن است، درحالی‌که قدرتی که در سیلندر ایجاد می‌شود بستگی بسرعت پیستون دارد. اما در لوکوموتیوها این سرعت به‌شکل استثنایی بالاست. از این مقدمه نتیجه‌گیری می‌شود که مقدار گرمایی که پوشهٔ بخار می‌تواند انتقال دهد نسبت به توان ایجاد شده، کم است. اما در مقابل باید گفت که با کاربرد بخار داغ می‌توان با هر ضربهٔ پیستون، مقدار بسیار زیادی گرما در سیلندر وارد کرد و این مقدار باز با سرعت پیستون متناسب است.

در مورد کاربرد بخار داغ در ماشینهای ثابت باید گفت که این روش به‌طور قطعی در ۱۸۹۰ عملی شد، اما ویژهٔ توربینها، یعنی به‌شکل کاملاً دیگری، بود.

در حقیقت، در یک ماشین بخار پیستوندار، بخار داغ، همان‌طورکه هم اینک گفته شد، تنها این نقش را دارد که در زمان ورود بخار به سیلندر، بدون اینکه میعانی ایجاد شود، گرما را به سیلندر انتقال دهد. بدین‌ترتیب، از به‌هم خوردن چرخهٔ کار در اثر جدار جلوگیری می‌شود. اما در توربینها اثر

جدار وجود ندارد و مکانیسم در دمای ثابت کار می‌کند. بدین‌ترتیب، بخار داغ نقش ترمودینامیکی خود را اعمال می‌کند. جداسازی منبع سرد از منبع گرم را افزایش می‌دهد.

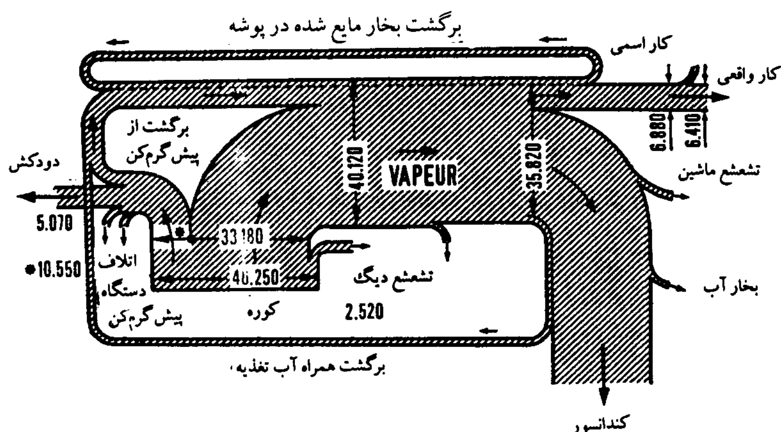
چند کلمه‌ای هم دربارهٔ گرمسازی مجدد یا داغ کردن میانه؛ که در ماشینهای مرکب کشتی عملی می‌شد باید گفت. آقای یرنشتت[1] که به سال ۱۸۱۷ یک کشتی بخاری با ماشین وولف ساخته بود، ظاهراً نخستین کسی است که این روش را به‌کار گرفته است. آقای رونتگن هلندی که در فرصت مربوط به ماشینهای دو انبساطی از وی سخن خواهد رفت؛ نیز آن را به‌کار برده است. اما این بنژامن نورمن بود (که درباره وی هم در آینده خواهیم گفت) که این روش را به سال ۱۸۶۰ معمول داشت. گرمسازی مجدد و ملایم در بالا دست طبقهٔ دارای فشار کم، بشرطی که به دماهای بالا نرسد نتایج بسیار مفیدی می‌دهد. برای طبقه بالا، بهتر است از پوشه استفاده شود. ما گرمسازی مجدد میانی را که روی توربینها عمل شده است با عنوان داغی مجدد، بررسی خواهیم کرد.

پوشهٔ بخاری: درگذشته به پوشهٔ بخاری اشاره‌ای شده است. در واقع، در پرتو نظریهٔ تجربی، فهمیده شد که نقش این پوشه، که مدتها مرموز مانده بود، تفاوت بنیادی با نقش داغ کردن بخار ندارد. وظیفه هر دو درحقیقت: تهیه مقدار گرمای لازم برای جلوگیری از میعان اولیهٔ بسیار زیاد است. بنابراین، پوشهٔ بخاری نقش فعالی دارد، چیزی که از مدتها پیش، بررسان دقیق ماشین بخار با درنظرگرفتن مقدار آبی که در اینجا مایع می‌شد اظهار داشته بودند. اما گرچه این پوشه مقداری گرما مصرف می‌کند، بهترین استفاده از این گرما را ممکن می‌سازد.

همان‌طورکه می‌دانید این پوشه اختراع وات بود و پس از وی کم‌وبیش به فراموشی سپرده شد و در عیبجویی از آن می‌گفتند که تنها تأثیر آن، افزایش سطح تشعشع است. ماشین‌سازان دیگری آن‌قدر کاربرد آن را به غلط فهمیده بودند که بخار خروجی را دور ماشین می‌گردانیدند. همان‌طورکه گفته‌ایم، کارهای نخستین، که نتیجه آنها تشکیل نظریهٔ تجربی بود، بقصد ترویج دوبارهٔ پوشه بخاری نوشته شده بودند. درحقیقت در اواسط این سده بود که سازندگان ماشینهایی از نوع وولف و کورنوال لجوجانه به پوشه وفادار ماندند.

ماشین بخار، صنعتی رام شده: در اواخر سدهٔ نوزدهم، وضع بکلی تغییر یافت. مهندسان مأمور یک طرح، اینک دارای کارتهای برنده‌ای بودند که براحتی می‌توانستند با آنها بازی کنند. این کارتها عبارت بودند از: ۱) داغ کردن بخار؛ ۲) پوشهٔ بخار زنده؛ ۳) انبساط چندگانه، که بعدها آن را تحلیل خواهیم کرد. مکانیسم هریک از این روشها آن اندازه شرح داده شده‌اند تا اینکه بتوان برای رسیدن به نتیجه‌ای مشخص، آنها را با موفقیت با یکدیگر ترکیب کرد. بدین‌ترتیب ما از زمانی‌که ماشین

1. Jernstedt



شکل ۲۱.ترازنامهٔ کاربرد حرارت در یک ماشین پیستوندار، حدود سال ۱۹۰۰
کوره در هر دقیقه ۴۶۲۵۰ کالری تولید می‌کند که ۶۴۱۰ کالری آن به‌کار مکانیکی مفید تبدیل می‌شود؛ یعنی بازدهی برابر ۰/۱۴ به اهمیت اتلاف کندانسور توجه کنید، حدود ۳/۵ گرمای تولید شده کوره است.

بخار، گرچه نسبتاً کامل بود در واقع هنوز برای کسانی که با آن کار می‌کردند ناآشنا بود بسیار دور شده بودیم. برای این تغییرات چه محدودهٔ زمانی می‌توان تعیین کرد؟ حدود سال ۱۸۹۰ صنعت ماشینهای بخار را می‌توان به‌اندازهٔ کافی رام شده دانست. اصطلاح دیگری صراحت کمتری دارد: تنها می‌توان یادآور شد که حدود سال ۱۸۴۰ بود که مسایل را، ناگزیر، روی مرز امکان نظری و امکان عملی قرار می‌دادند. بدین‌ترتیب ـ شاید از این تاریخ طولانی ماشینهای بخار بتوان چنین نتیجه گرفت ـ برای اینکه Software (نرم‌افزار) با hardware(سخت‌افزار) همراه شود، کمتر از نیم سده کافی نبود (شکل ۲۱).

مسألهٔ دتانت

دتانت یک سیلندری

دتانت (کاهش فشار) و کاربرد آن: در اواسط سدهٔ نوزدهم، پس از مدتهای زیاد به استفاده‌ای که از کاهش فشار بخار ماشین به‌دست می‌آید پی بردند و به‌طور وسیعی آن را به‌کار گرفتند. اما بالا بردن فشارهای کاری دیگ، که ویژهٔ نیمهٔ دوم این سده است تغییرات بزرگی در مکانیسم را سبب شد.

آقای وات دتانت را تعریف کرده و آن را به ثبت رسانیده است (رجوع کنید به مجلد سوم). اما وی فشار اتمسفر را به‌عنوان فشار نخستین و خلاء یک کندانسور در دمای حدود ۴۰ درجه را به‌عنوان فشار نهایی معرفی می‌کرد. بین این دو حد، کاربرد دتانت با ماشین بخار پیستوندار، سودی به‌همراه نداشت. به مقاطع بزرگی جهت عبور بخار منجر می‌شد و تنها به نیروهای ضعیفی دست می‌یافت. ثبت اختراع آقای وات گویا مخصوصاً در جهت سد کردن راه رقبای احتمالی بود.

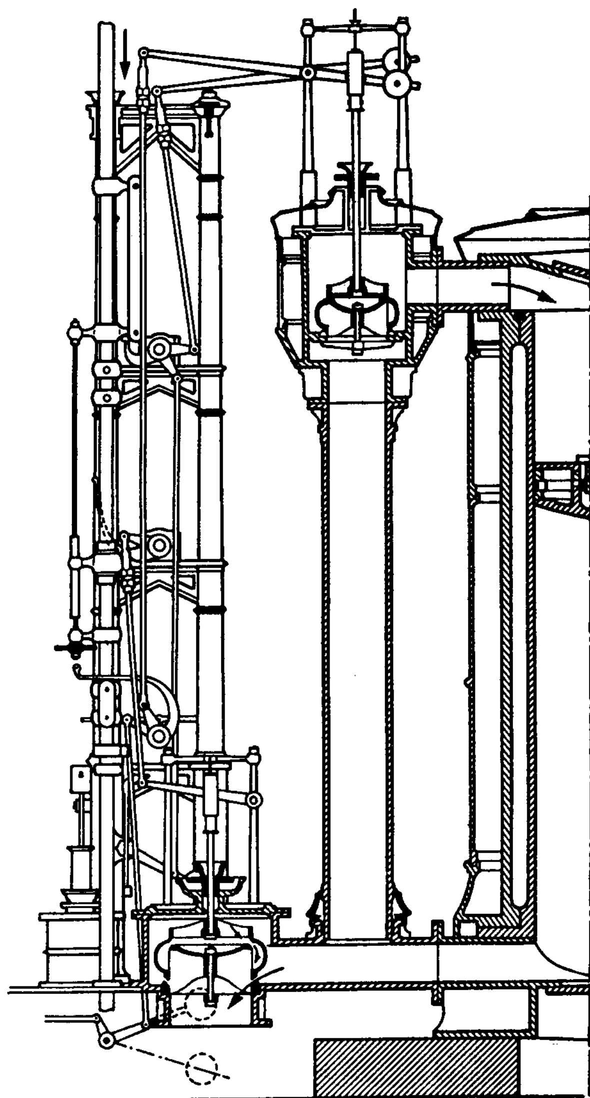
کاربرد واقعی دتانت تقریباً هم زمان با سدهٔ نوزدهم یعنی زمانی شروع شد، که بخار با فشار بیش از یک اتمسفر ـ ۲ تا ۵ اتمسفر در نیمهٔ نخست این سده ـ مورد استفاده قرار می‌گرفت.

هر دو روش اساسی ایجاد دتانت یکباره پدید آمدند. یکی از آنها شامل راندن گاز در یک سیلندر با حجم بزرگتر بود، و این ویژهٔ ماشینهای بخار دو یا چند انبساطی است که دربارهٔ آنها بعدها سخن خواهیم گفت. روش دیگر بستن راه ورودی بخار پیش از زمانی که پیستون به انتهای مسیر خود برسد. روش اخیر را دتانت یک سیلندری می‌گویند که اینک بدان می‌پردازیم.

ماشینهای کورنوال: کهنترین ماشینی که با روش دتانت یک سیلندری کار می‌کرد تلمبه‌های کورنوال بودند، تلمبه‌های یکطرفه بزرگی که مآخذ آنها در مجلد پیشین بررسی شدند. تبلیغاتی که در سال ۱۸۳۵ به سود تلمبه‌ای که در محل فاولی کنسولز[1] نصب شد انجام گرفت به یک اندازه خوش‌بینی و بدبینی ایجاد کرد. و آقای تامس‌ویکستید[2] را برانگیخت تا برای مقایسه ماشین وات با یک ماشین کورنوال آزمایشهایی انجام دهد. این آزمایشها به‌حساب East London Waterworks در اولدفورد در حوالی لندن انجام گرفت. نتیجهٔ این آزمایشها دو برابر و نیم به سود ماشین کورنوال نسبت به ماشین وات بود. این رقم در سال ۱۸۴۱ انتشار یافت و از این تاریخ به بعد ماشین کورنوال رواج روزافزونی یافت.

در این ماشینها طرز تأثیر بخار مانند ماشینهای اولیهٔ یکطرفهٔ وات بود. توزیع بخار بوسیلهٔ سوپاپها مثل همان ماشین سازنده اسکاتلندی، بود، اما این سوپاپها که تغییر شکل خوبی به آنها داده شده بود، عمل دتانت را ممکن می‌ساختند. درواقع ورود و خروج بخار را سوپاپهای معینی تنظیم می‌کردند. حرکت این سوپاپها در ماشینهای قدیمی نیوکامن بوسیلهٔ قطعه‌ای به نام *plug-rod* هدایت می‌شد و آن عبارت بود از یک میلهٔ عمودی آویزان از شاهنگ. در این مکانیسم، معلوم است که زبانه‌هایی که روی این میله ثابت شده بودند، اهرمهای سوپاپها را در حین گذر خود معلق می‌کردند. تنها کافی بود که زبانهٔ مربوط به سوپاپ ورود بخار را در جای درستی قرار داد و تا پیش از پایان مسیر، سوپاپ بسته شود (شکل ۲۲).

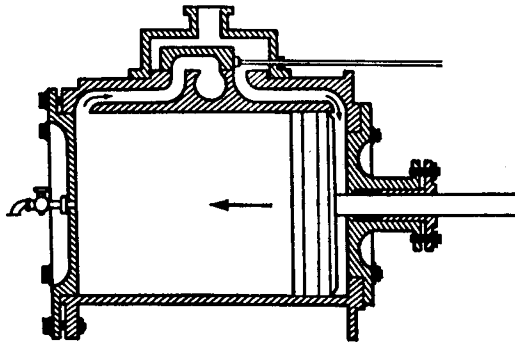
1. Fowley Consols 2. Th. Wicksteed



شکل ۲۲.ماشین کورنوال

سمت راست: نمای برشی از سیلندر و ستون توزیع بخار با یک سوپاپ؛

سمت چپ: مکانیزم توزیع بخار. در انتهای سمت چپ، میله حامل زبانه‌ها دیده می‌شود این میله با اهرمهای گوناگون به سوپاپها فرمان می‌دهد. یک چرخ طیار با تأثیر روی یک پیچ سبب جابه‌جا شدن این زبانه‌ها می‌شود. سوپاپ بالا اگر در وسط باشد تعادل برقرار است. اگر این سوپاپ بسته شده باشد دتانت شروع می‌شود. در پشت صحنه، سوپاپ ورودی گاز بسته شده است (پیدا نیست). در پایین سمت چپ، سوپاپ فرار بخار باز است.

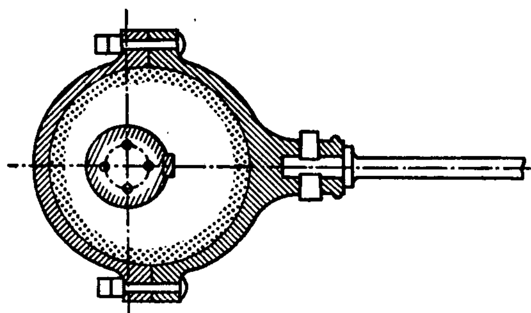


شکل ۲۳.سیلندر ماشین بخار دو طرفه، توزیع بخار با کشوی کاسه‌ای.
بخار از راه لوله‌های بالا از دیگ وارد ماشین می‌شود. فرار بخار از زیر کاسه در لوله‌ای که عمود بر این نقشه است انجام می‌گیرد.

به‌عنوان مثال، ماشینی را که مؤسسه لوکروزو و در سال ۱۸۵۲ ساخته بود بررسی می‌کنیم. این ماشین از نوع کورنوال و مربوط به تأسیسات شایو بود که در آغاز امپراطوری دوم به‌جای ماشینهای کهنهٔ وات بوسیلهٔ برادران پریه کار گذاشته شد. قطر داخلی استوانه ۱/۸۰ متر و طول رفت پیستون ۲/۴۵ متر بود. برای این نوع ماشینها این ارقام عجیب نبود. سرعت حرکت پیستون معمولاً ۶ تا ۸ ضربه در دقیقه بود. در سال ۱۸۶۲ مصرف زغال در هر ساعت برای هر اسب ۲/۶۵ کیلوگرم بود که مقدار بالایی است. فشار کاری دیگ ۳/۵ اتمسفر بود. در مورد دتانت، چنین می‌نماید که اغلب چهاردهم بخار ورودی، یعنی نرخ آن ۲/۵ بود. نتایجی که آقای ویکستید ارائه داشت بهتر بود، اما در آزمایشهای این‌چنینی و شرایط عادی کار، تفاوت زیادی وجود دارد.

توزیع بخار بوسیلهٔ کشو: ما توزیع بخار با سوپاپها را شرح دادیم. بخش بسیار بزرگی از سدهٔ نوزدهم از توزیع بخار با کشوی کاسه‌ای برخوردار بود. لزوم کاربرد دتانتی که در خور توزیع بخار با کشو باشد مشکلات بزرگی پدید آورد.

کشوی کاسه‌ای یک قطعه توخالی (خود کاسه)، با حرکت متناوب بود که روی آیینه‌ای صیقل یافته و دارای سه سوراخ می‌لغزید. در شکل زیر طرز کار کشوی کاسه‌ای روشن می‌شود (شکل ۲۳). این کشو معایبی داشت که بعدها آنها را بررسی خواهیم کرد. استقبال عمومی از آن به علت مزایای جدی آن بود. این کشو جفت و جذب می‌شد زیرا فشار دیگ بخار، کاسه را روی آینه می‌چسبانید. وانگهی فرسایش آن سبب جفت و جذبی بیشتر می‌شد، زیرا بخشهایی که به یکدیگر مالیده



شکل ۲۴.لنگ هلالی.روی محوری عمود بر صفحهٔ تصویر سوار شده است.

می‌شدند بیشتر صیقل می‌یافتند.

فرمان کشو: بزرگترین عیب کشو این بود که حرکت کاسه نمی‌توانست بسیار سریع باشد. در نتیجه، آن چیزی که اتلاف مقطع مؤثر نامیده می‌شد اتفاق می‌افتاد؛ یعنی مجراهای بخار مدتی بسته یا نیم‌باز می‌ماند.

در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم در ماشینهای با انبساط دوگانه که آقای وولف اختراع کرده بود با فرمان دادن به کشو به کمک یک بادامک این عیب تا حدودی برطرف شد. این بادامک مثلثی شکل با اضلاع هلالی بود که در یک کادر چهارگوش جای داشت. با این وسیله کشو سریعاً از یک موقعیت به موقعیت دیگر انتقال می‌یافت و در پایان مسیر متوقف می‌شد. اما اشکالات بزرگ ساخت آن، سبب شدند که این بادامک وولف کنار گذاشته شود.

لنگ هلالی: در واقع فرمان به‌طورکلی بوسیلهٔ یک لنگ هلالی عمل می‌کرد و حرکتی سینوسی به کشو القا می‌نمود (شکل ۲۴) بنابراین در پایان مسیر، سرعت در حداقل و در میانه مسیر، حداکثر بود. مقطع مؤثر دو ثلث بود درحالی‌که با روش بادامکی که شرح آن گذشت سه‌چهارم. کشو و دستگاه فرمان خارج مرکزی آن، در سالهای ۱۷۹۹ ـ ۱۸۰۱ در محفل اطرافیان وات شناخته شده بودند. شکی نیست که آنها لزوم اتصال قائم لنگ به بازوی حرکت‌دهنده را دفعتاً احساس کردند تا اینکه حداکثر سرعت کشو با حداقل سرعت پیستون یا حداقل سرعت کشو با حداکثر سرعت پیستون همزمان باشد.

پوشش: برای اینکه در هر زمان و بویژه در اواسط مسیر، آب‌بندی کشو تأمین شده باشد می‌بایست به دورهٔ کاسه، لبه‌هایی اضافه می‌شد. تا قطر آنها کمی بزرگتر از سوراخهای ورود بخار باشند. این

کار را پوشش دادن می‌نامیدند. از آغاز پیدایش کشو، یک پوشش بسیار نازک مطمئناً لازم به‌نظر آمد، بعدها از سرنوشت نهایی پوشش آگاه خواهیم شد.

پیش‌افتادگی: اگر قطعه لنگ فرمان دقیقاً با زاویهٔ ۹۰ درجه به باز و متصل می‌شد، با در نظر گرفتن پوشش، زمانی‌که پیستون به‌سوی انتهای مسیر خود حرکت می‌کرد در بخش بزرگی از مسیر خود از تأثیر بخار آزاد بود و بویژه برای فرار بخار غیرفعال ضربهٔ پیشین هیچ منفذی وجود نداشت.

بنابراین، ترتیبی داده شد تا اینکه کشو، پیش از اینکه پیستون حرکت خود را به‌سوی هر یک از دو سر مسیر آغاز کند منفذ ورود بخار یا فرار آن را باز نگهدارد. این امر با دستکاری زاویهٔ اتصال لنگ، حاصل می‌شد. مقدار اضافه بر ۹۰ درجه این زاویه را مکانیسین‌های قدیم، پیش‌افتادگی می‌نامیدند.

منشأ پیش‌افتادگی زیاد شناخته شده نیست. لزوم آن با سریعتر شدن حرکت ماشین ضروریتر می‌شود و احتمالاً در انگلستان در حدود سال ۱۸۲۹ ضمن کار استیونسن بدان پی‌بردند. مؤلفی از فرانسه با دیدن لوکوموتیوهای انگلیسی در سال ۱۸۳۵ از آن نام برده است. با این‌همه چنین می‌نماید که کاربرد آن در فرانسه به ابتکار مکانیسین‌های انگلیسی مأمور لوکوموتیوهای نخستین راههای فرانسه، بویژه در ناحیهٔ پاریس در سال ۱۹۳۷ بوده است.

نتیجه می‌گیریم که کاربرد پوشش و نیز پیش‌افتادگی در مراحل مختلف کار سیلندر، نتایج زیر را داشت:

۱. ورود زودتر بخار، پیش از آنکه پیستون مسیر مقاوم، و فاز تراکم را به پایان رساند. پیستون در واقع رفت خود را علی‌رغم بخاری که از دیگ می‌رسید به پایان می‌رسانید. این تراکم چنانچه متعادل باقی می‌ماند مفید بود؛ زیرا حرکت این مکانیسم را آرام می‌ساخت و ایجاد تعادل فشار بین دیگ بخار و سیلندر را شتاب می‌داد.
۲. ضربهٔ حرکت دهنده: ورود بخار و سپس دتانت.
۳. خروج پیش از موقع، پیش از آنکه پیستون ضربهٔ حرکت‌دهندهٔ خود را به پایان رساند. در اینجا نیز عجله در خروج چنانچه آرام انجام گیرد مفید بود. این وضع با حضور فشار متقابل در آغاز ضربهٔ مقاوم مقابله می‌کند.
۴. ضربهٔ مقاوم: خروج بخار.

تحول با ترتیب زمانی: طرزکار یک توزیع‌کنندهٔ کشویی شرح داده شد. به‌طوری‌که هم‌اکنون خواهیم گفت، چنین مکانیسمی تنها در حدی می‌تواند برای عمل دتانت آمادگی داشته باشد که دتانت از میزان متعادل فراتر نرود. بنابراین، در تاریخ ماشینهای یک سیلندری دارای دتانت، دو مرحله

تشخیص داده می‌شود: ۱) دوران نخستین که در سالهای ۱۸۳۵ ـ ۱۸۴۲ آغاز می‌شود. در این دوران از کشو با مقداری دستکاری استفاده می‌شد؛ ۲) دوران دوم که پس از سال ۱۸۷۰ است، طی این دوران، کشو به‌علت بالا رفتن فشارها کنار گذاشته شد.

دتانت ثابت به کمک پوشش: با افزایش پوشش خارجی کشوی کاسه‌ای می‌توان بخشی از دتانت به‌دست آورد. یک مؤلف فرانسوی در سال ۱۸۴۰ توجه داد که این فرآیند پس از چندی در انگلستان روی لوکوموتیوها متداول شد.

ناراحتیهای مربوط به پوشش، ناشی از این واقعیت بود که کشو که متقارن بود، تراکم و خروج پیش از موقع را افزایش می‌داد. دتانت در واقع در ثلث پایانی مسیر پیستون انجام می‌گرفت. این وضعیت در آن زمان برای استفاده‌های عمومی بویژه در لوکوموتیوها، رضایتبخش بود.

دتانت تنظیم‌پذیر: علاقهٔ زیادی برای کنترل کردن میزان دتانت، در صورت متغیر بودن بار، در زمان کار ماشین بخار ابراز می‌شد. در اینجا هم لوکوموتیوها بویژه مورد نظر بودند. سیستم تنظیم‌پذیر بودن دتانت در سالهای ۱۸۴۰، به‌هنگام گسترش زیاد راه‌آهن مورد بررسی فراوان قرار گرفت.

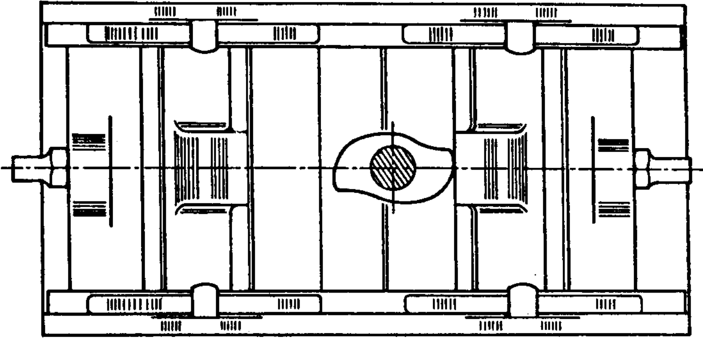
انواع راه‌حلها به‌کار گرفته شدند که از آن میان بویژه دو راه‌حل مورد توجه قرار گرفتند. راه‌حل نخست در واقع اضافه کردن یک قطعه تکمیلی به کشو معمولی بود، این قطعه در زمان دلخواه ورود بخار را سد می‌کرد. ماشین‌سازان پرآوازه متعددی، بویژه ادواردز، پس از وی آقای میبر بخصوص فارکو مکانیسمهایی را طرح کردند که به‌علت نداشتن استحکام لازم، مدت زیادی روی لوکوموتیوها تاب نیاوردند اما مدتها روی ماشینهای ثابت بخار و ماشین بخار کشتی به‌کار می‌گرفتند (شکلهای ۲۵ و ۲۶).

کولیس: در مورد لوکوموتیوها، وسیله‌ای که بسیار مهم شمرده می‌شد کولیس استیونسن بود، وسیله‌ای که در واقع در سال ۱۸۴۲ بوسیلهٔ یک همکار جوان این ماشین‌ساز پرآوازه، که هاو[1] نام داشت طرحریزی شده بود.

این وسیله در آغاز بیشتر برای تغییر حرکت ساخته شده بود. اما باید گفت که یک ماشین بخار دارای کشوی لنگ را، این وسیله تنها در یک جهت معین می‌توانست بگرداند. برای اینکه در جهت مقابل گردانده شود لازم بود که کشوی لنگ موقعیت متفاوتی را اشغال کند، موقعیتی که نسبت به بازوی حرکت‌دهنده متقارن با قبلی باشد (شکل ۲۷).

لوکوموتیوهای اولیه برای هر سیلندر، تنها یک لنگ آزاد شونده به توسط یک بوشن کلاچ داشتند. تغییر حرکت در توقف انجام می‌گرفت و مکانیسین می‌بایست زیر ماشین خود برود. بعداً

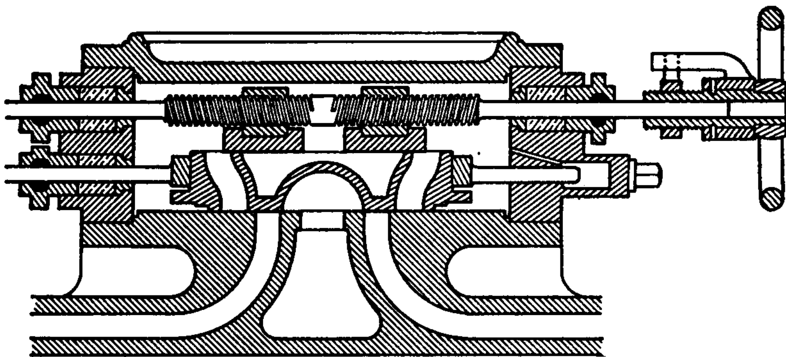
1. Howe



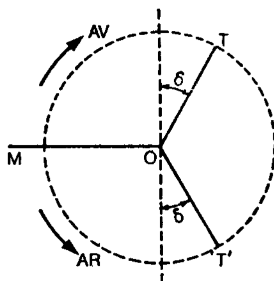
شکل ۲۵.دتانت فارکو
زائده‌ای به‌شکل خاص که در وسط قرار دارد دو نیم صفحهٔ دتانت را کنترل می‌کند، و زمانی‌که زائده گردانیده می‌شود مسیر کم و زیاد می‌شود.

از سیستمی که دو لنگ داشت استفاده کردند رجوع کنید به مجلد سوم،صفحهٔ ۵۰۹).از آن پس مجهز بنوعی میلهٔ برگشت بخار شدند که از پلاتفرم ماشین فرمان می‌گرفت.

در کولیس استیونسن همان ترتیب لنگها ادامه یافت با این تفاوت که لغزنده‌ای قوسی شکل آنها را به یکدیگر مرتبط می‌ساخت (شکل ۲۸). کشو در دو انتهای مسیر خود از طریق یکی از دو

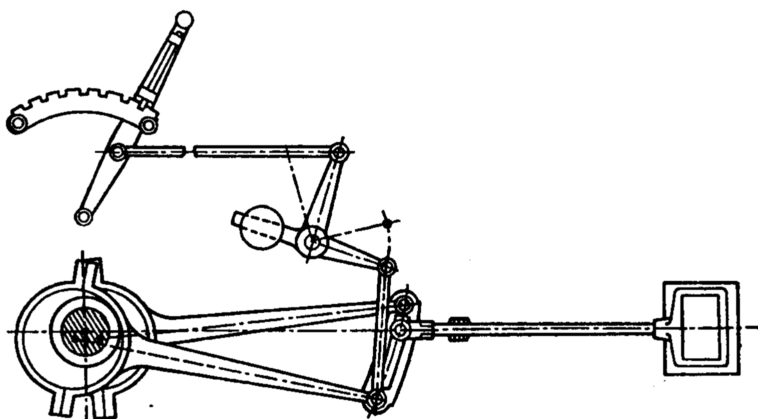


شکل ۲۶.دتانت میر، برش طولی
کشوی کاسه‌ای دارای دو مجرا، که دو نیم صفحهٔ دتانت می‌توانند آنها را ببندند. در این شکل وقتی میلهٔ حامل دو دندهٔ دو پیچ متقابل گردانیده شود جدایی صفحات تغییر می‌کند.



شکل ۲۷.لنگی حرکت پیش از T و لنگی حرکت پس از T′ هر دو نسبت به خط عمود بر بازوی M دارای زاویهٔ یکسان δ هستند. مقدار این زاویه به‌علاوهٔ ۹۰ درجه، زاویهٔ پیش‌افتادگی را تشکیل می‌دهد.

لنگ مستقیماً فرمان می‌گرفت. حرکت کشو در میانهٔ راه برابر صفر بود؛ در این نقطه متوقف می‌ماند و هر دو دریچهٔ ورود بخار را می‌بست. در دیگر نقاط مسیر، حرکت کشو چنان است که گویا از یک لنگ مجازی فرمان می‌گیرد و بسته به اینکه درکجای مسیر قرارگرفته باشد مسیرکوتاه یا طولانی دارد. اما باید گفت که در این لنگ مجازی، علاوه‌بر اینکه مقدار خروج از مرکز تغییر می‌کند، زاویهٔ اتصال آن چنان تغییر می‌یابد که زمانی‌که به موقعیت وسط نزدیک می‌شود دتانت افزایش می‌یابد.



شکل ۲۸.کولیس استیونسن، آرایش کلی آن
در سمت چپ: لنگهای حرکت پیش و پس. خود کولیس قطعه‌ای هلالی است که در وسط شکل دیده می‌شود. در سمت راست، کشو و میلهٔ آن است. در بالا، اهرم تغییر حرکت دیده می‌شود.

کولیس والسخائرتس: در میانهٔ این سده ترکیب کولیس استیونسن با کشویی که با کمی پوشش همراه می‌شد تقریباً تنها وسیله‌ای برای حرکت دادن لوکوموتیوها با دتانت تنظیم‌پذیر بود اما، علاوه‌براین باید از کولیس والسخائرتس هم نام برد، وسیله‌ای که در سال ۱۸۴۴ طرحریزی و حدود نیم سده هیچ توجهی بدان نشده بود. در حدود سال ۱۸۹۵ کاربردی عمومی روی لوکوموتیوها یافت. در واقع زمانی‌که کشوها روی سیلندر گذاشته شدند آنها را هم بیرون آن قرار دادند و این مکان مناسبی برای کولیس در آن زمان شد (رجوع کنید مجلد سوم صفحه ۵۱۰).

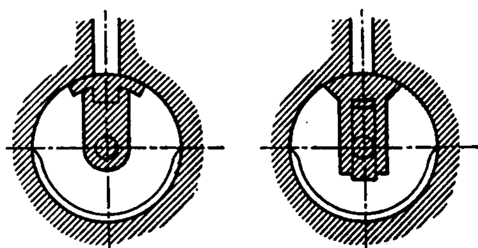
توزیع بخار با ابزار زبانه‌ای: اینک به بررسی ماشینهای به‌اصطلاح چهار کشویی دارای ابزار زبانه‌ای می‌پردازیم؛ این ماشینها پس از سال ۱۸۷۰ غالباً در کار بودند.

اصطلاح چهار «کشو» مربوط به ماشینهای دوطرفه‌ای است که ورود و خروج بخار بوسیله چهار شکاف مشخص و مخصوص انجام می‌گرفت. این شکافها در آن زمان با دمای ثابت کار می‌کردند و این امر اثر جدار را کاهش بسیار می‌داد. در واقع با فشارهای ۸ کیلوگرم که در این دوران متداول بود، تفاوت دمای ورود و خروج بخار در ردیف ۸۰ و ۱۲۰ درجه صد بخشی (سانتیگراد) بود.

این فکر جدا کردن شکافها قدیمی است. در سال ۱۷۹۶ سایه‌هایی از آن دیده شد و گاه‌گاهی در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم به‌کار رفته است. اما این عمل تنها زمانی‌که بدان نیاز بود عمومیت یافت.

بخاربندها: کاربرد ماشینهای چهارکشویی معمولی در آن زمان، در واقع نوعی تناقض بود، زیرا این دوره با ترک کشوهای کاسه‌ای مشخص می‌شود. برای حرکت دادن کاسه‌ای که روی شیشه با فشار ۸ کیلوگرم و بیشتر قرار داشت کار زیادی لازم بود؛ وانگهی داخل کاسه و مجاری خمیده‌ای که از شیشه به سیلندر راه داشتند سطوح قابل توجهی را تشکیل می‌دادند که اثر جدار را با تمام قوا اعمال می‌کردند. بدین ترتیب، از این پس بخاربندهای گردان به‌کار گرفته می‌شد که با جابه‌جایی کم آنها و قرارگرفتن سطح کوچکی در معرض اثر بخار، سوراخهای بزرگی برای عبور گاز باز می‌شدند (شکل ۲۹) در این زمان از سوپاپهایی نیز استفاده می‌شد که ایجاد تعادل در آنها آسان بود.

دتانت کُری: اصطلاح ابزار زبانه‌دار ناظر به بستن فوری ورود بخار در لحظهٔ شروع دتانت است. در آن زمان در ماشین بخار کورنوال، حرکت سوپاپها نسبت به مدت زمان رفت آنها، همان‌طورکه در گذشته گفته‌ایم، سریع بود. بعدها کوشیدند تا نتیجه‌ای مشابه با توزیع بخار با کشوهای نوع میبر یا فارکو به‌دست آورند. در اینجا باید نامی هم از دتانت کُری برده شود. این شخص مهندس شرکت



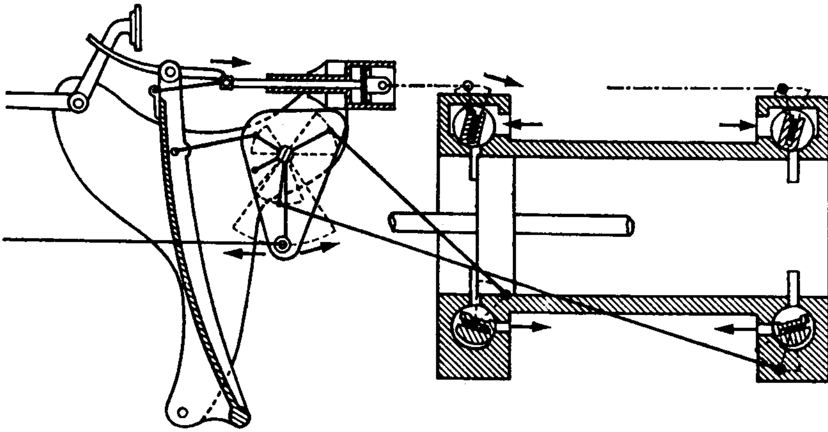
شکل ۲۹.بخاربندهای کورلیس. قطعهٔ متحرک، نوسان دایره‌ای دارد.

پاول در شهر روان و کارشناس در ساخت ماشینهای پر قدرت وولف بود. دتانت کُری تا زمانی‌که این نوع ساخت رواج داشت، یعنی مدت زیادی به‌کار گرفته می‌شد.

ساخت مکانیکی ابزار زبانه‌دار: به‌طورکلی همه ابزارهای زبانه‌دار دتانت، گرچه در اصل بسیار ساده هستند، ساخت پیچیده‌ای دارند. همیشه یک فنر عقب کشنده در آنها به‌کار می‌رفت که با پیمودن بخشی در مسیر بتدریج کشیده می‌شد. قطعه‌ای که یک رگولاتور محل آن را تعیین می‌کرد فنر را آزاد می‌ساخت و دریچهٔ ورود بخار بتندی بسته می‌شد. کمک فنری پیستونی به نام *dash-pot* که با هوا یا روغن کار می‌کرد تکان دستگاه را کاهش می‌داد. مشکل اصلی که در اینجا دیده می‌شود در حقیقت مربوط به چگونگی طرح زبانه نیست بلکه طرز ساخت آن است که بتواند در سالهای زیاد میلیونها بار به‌طور دقیق عمل کند. در اینجا شخص سلاحهای آتشین را تداعی می‌کند که رشته‌ای از فعالیت را دربر می‌گیرند که خواص متضاد ظرافت و خشونت تقریباً به همین طرز با هم تلفیق داده شده‌اند. در ماشینهای بخار دارای ابزار زبانه‌دار، قطعات ضربه خور، آستری از فولاد با حداکثر سختی به‌دست آمده در آن زمان را داشتند.

دتانت تنظیم‌پذیر: جای قطعهٔ حرکت‌دهندهٔ زبانه را رگولاتور تعیین می‌کند و بدین‌ترتیب کم کردن مدت ورود بخار را به‌هنگام افزایش سرعت ممکن می‌سازد. این کاربرد رگولاتور از مکانیسمی که وات پیشنهاد کرده بود بسیار بهتر بود. طبق مکانیسم پیشنهادی وات، فقط دهانهٔ لولهٔ بخاری که از دیگ می‌رسید کوچک می‌شد؛ اما رگولاتور لزوم دتانت را آشکار را مطرح می‌ساخت.

ماشین کورلیس: آقای کورلیس نخستین اختراع خود را در ۱۸۴۹ به ثبت رسانید. وی هویت امریکایی داشت و مورخان آنگلوساکسون افتخار اختراع دتانت تنظیم‌پذیر با رگولاتور را متفقاً به وی نسبت می‌دهند. در واقع فارکو در سال ۱۸۳۶ در این‌باره اختراعی را به ثبت رسانیده بود و پس از او آقای میبر در حدود سالهای ۱۸۴۰ تا ۱۸۵۰ از وسیله‌ای شبیه بدان استفاده می‌کرد. اما



شکل ۳۰.شکل اجمالی توزیع‌کننده کورلیس با تیغهٔ شمشیری.
این مکانیسم را میل‌لنگی حرکت می‌دهد که خارج از شکل در قسمت چپ قرار دارد. بخاربندهای زبانه‌داری، در قسمت راست، در بالای سیلندر دیده می‌شوند. در بالا در سمت چپ، مکانیسم زبانه‌داری که رگولاتور آن را کنترل می‌کند، نشان داده شده است. در وسط شکل، کمک فنرهای از بین برندهٔ لرزشهای بخاربند دیده می‌شوند.

سیستم وی تنها پس از سال ۱۸۷۰ همراه ماشینهای کورلیس واقعاً رواج یافت و به همین‌دلیل، اختراع آن به این شخص امریکایی نسبت داده شده است.

آقای جرج هنری کورلیس در سال ۱۸۱۷ تولد و در ۱۸۸۸ وفات یافت. ما، هم‌اکنون گفتیم که وی نخستین اختراع خود را در ۱۸۴۹ به ثبت رسانید. در زمینهٔ ساخت ماشینهای دارای چهار توزیع‌کننده، وی هشت سال از هموطن خود آقای سیکلز[1] (که در سال ۱۸۴۱ اختراعش را به ثبت رسانید) عقبتر بود. اما آقای سیکلز از سوپاپها استفاده می‌کرد ـ وسیله‌ای که بسیار بعد وارد عمل شد. بخار بندهای گردان به احتمال فراوان بوسیلهٔ کورلیس متداول شدند. گرچه امریکایی دیگری با نام گرین[2] در حدود سال ۱۸۵۵ در به‌کار انداختن ماشین مورد بحث ما، نقشی داشته است.

به‌هرتقدیر، باید گفت که در نمایشگاه سال ۱۸۶۷ پاریس بود که ماشین کورلیس بخصوص، در اروپا شهرت یافت. رواج واقعی این ماشین در این دوره شروع شد (شکل ۳۰).

کورلیس از کار تکمیل اختراع خود لحظه‌ای غافل نبود و تا زمان مرگ خود انواعی از توزیع‌کنندگان بخار را پیاپی پیشنهاد می‌کرد. سه نسل از ماشین وی شناخته شده‌اند که به ترتیب

1. Sickels 2. Green

عبارتند از: شمشیری، دارای بازوهای آویزان (یا بشقاب مرکزی) و بالاخره نوع پای عنکبوتی. این تکمیلها بمنظور افزایش مقدار بخار ورودی انجام می‌گرفت. کاری که توزیع‌کنندهٔ شمشیری از انجام آن ناتوان بود.

رواج در اروپا: نخستین امتیازدار ماشین کورلیس در اروپا آقای وان دن کِرشوو[1] و از اهالی گان بود. وی حق امتیاز خود را در مورد فرانسه به آقای لوگاوریان[2] از اهالی لیل واگذاشت؛ این شخص یکی از قدیمیترین ماشین‌سازان فرانسه بود. این تجارتخانه نام کرپل[3] به خود گرفت.

از سال ۱۸۷۰ در شهر لیل ماشینهای دارای ۵۰ تا ۴۰۰ اسب قدرت با موفقیت ساخته می‌شدند. برای یک ماشین ۱۳۰۰ اسبی مشخصات زیر ملحوظ می‌شد: فشار ۴/۵ اتمسفر، سرعت ۳۹ دور در دقیقه، قطر داخلی سیلندر ۹۱۰ میلیمتر، طول رفت پیستون ۱/۶۸ متر. مصرف ۱ کیلوگرم برای هر اسب در یک ساعت به‌طور رسمی تضمین شده بود.

در فرانسه همچنین می‌توان از ماشینهای کورلیس ساخت کروزو، از سال ۱۸۸۳ نام برد. نوع آن درپی تحقیقات تجربی که در همان کارخانه کروزو انجام گرفته بود تغییراتی یافت.

آقای فارکو که حقوقی را به‌دست آورده بود که ابتدا به آقای بد[4] اهل ورویه تعلق داشت، جایزه بزرگ سال ۱۸۷۸ نمایشگاه پاریس را دریافت داشت و در سالهای ۱۸۸۹ نیز باز جایزه‌ای به وی تعلق گرفت و در سال ۱۹۰۰ م برای ساخت ماشینی با قدرت هزار اسب.

روشن است که آقای کورلیس در همه کشورها امتیاز و حق اقتباس ماشین خود را به دیگران واگذار کرده بود که شمارش آنها سودی ندارد.

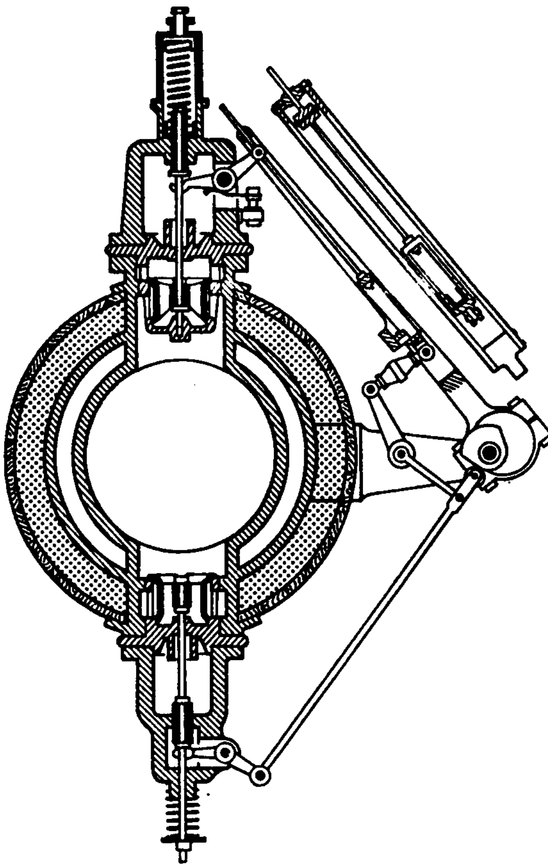
توزیع بخار با سوپاپها: بویژه در کشورهای آلمانی زبان ـ آلمان، سویس، اتریش ـ بخاربندهای گردان درگیر مسابقهٔ تنگاتنگی با سوپاپها بودند. سوپاپها نخست بوسیلهٔ تجارتخانهٔ مهم برادران زولتسر دروینترتور با دو ترتیب پیاپی در سالهای ۱۸۶۷ و ۱۸۷۸ به‌کار گرفته شدند و نیز درگان بوسیلهٔ آقای کارلز[5]، دارندهٔ امتیاز از زولتسر ساخته می‌شد (شکلهای ۳۱ و ۳۲).

با این ماشینها ما شاهد پیدایش میل سوپاپ برای فرمان دادن به سوپاپها هستیم ـ وسیله بسیار مشهوری که به موتورهای درونسوز به ارث رسیده است.

ماشینهای با جریان ثابت: برای اینکه بررسی ماشینهای یک سیلندری دارای دتانت بزرگ را به پایان بریم باید از دستگاه جالب دیگری که در ربع نخست سدهٔ بیستم بسیار رواج یافته بود نیز چند کلمه‌ای بگوییم. این دستگاه را ماشینهای با جریان ثابت یا فرار از وسط یا به‌اصطلاح

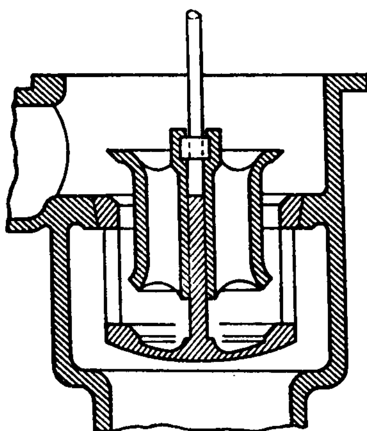
---

1. Van Den Kerchove 2. Legavrian 3. Crépelle 4. Bède 5. Carels

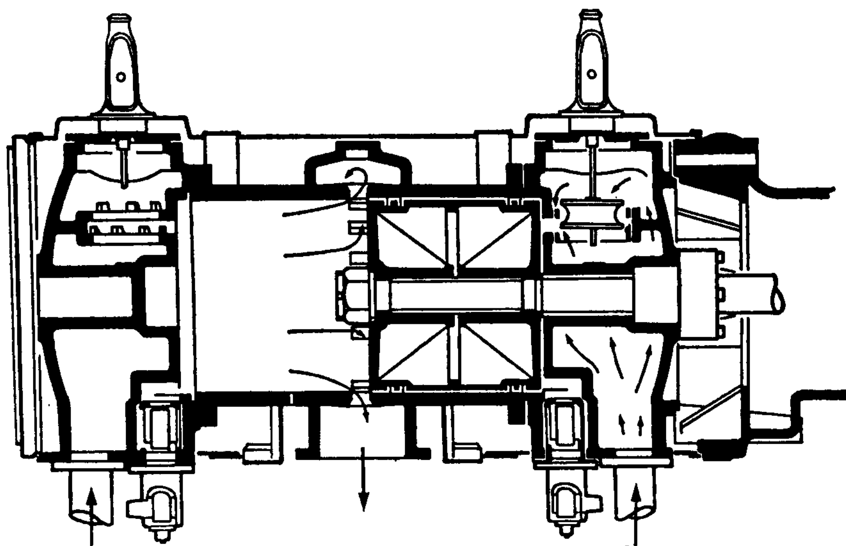


شکل ۳۱.ماشین سوپاپدار زولتسر.
برش عرضی سیلندر. سمت راست، میل سوپاپ. کمک‌فنرها، در بالا سمت راست، جداگانه نشان داده شده‌اند.

انگلیسیها uniflow engine می‌نامیدند. ورود بخار از دو سر استوانه انجام می‌گرفت، که یا از طریق بخاربندها یا بوسیلهٔ سوپاپها بود. فرار گاز در یک نقطهٔ مسیر عملی بود، و آن روزنه‌هایی در وسط طول استوانه بود. همان‌گونه که دیده می‌شود، در این ترتیب طول پیستون ناگزیر باید برابر مسیر، منهای طول روزنه‌های فرارگاز باشد (شکل ۳۳) کمبودهای گرمایی با فشارهای زمانه چنان شدید بودند که سیلندرها به‌شکل دهانهٔ بشکه ساخته می‌شدند و نابرابریها انبساط جدار آنها را



شکل ۳۲.سوپاپ زولتسر. با سوپاپهای شکل ۲۲ مقایسه کنید



شکل ۳۳.ماشین با جریان ثابت، برش طولی سیلندر.
فرار بخار از روزنه‌هایی صورت می‌گیرد که به‌شکل تاج در وسط شکل دیده می‌شوند. کشوی استوانه‌ای سمت چپ، جلوی ورود بخار را سد می‌کند.

صاف می‌کرد.

اندیشه فرار بخار از وسط، در سدهٔ نوزدهم بارها مطرح شده بود و در پایان سال ۱۸۸۵ آقای تاد[1] در انگلستان آن را به ثبت رسانید؛ اما ساخت آن مرهون آقای اشتومپ[2] از شارلوتنبورگ[3] در سال ۱۹۰۸ است و تولید آن را نخست کارخانهٔ ارسته برونر ماشینن‌فابریک[4] در برنو[5] عهده‌دار شد.

کاربرد الکتروتکنیک: طی ده یا پانزده سال پایانی سدهٔ نوزدهم گسترش سریع الکتروتکنیک حوضهٔ جدیدی برای کاربرد ماشینهای بخار ثابت و پرقدرت گشود. نمایشگاه سال ۱۹۰۰ پاریس، اوج این رشته بود. این دوره همچنین عهد وسایل پرنده با عرض چند متری بود و همچنین می‌توان از گروههای ماشین‌ساز واقعاً غول‌آسای متعددی نام برد. در واقع زمینهٔ تحول بعدی اینک آماده شده بود.

کاربردهای اولیهٔ توربینهای بخاری روشن ساختند که در جهت افزایش سرعت و قدرت موتورها و نیز کم کردن همهٔ ابعاد آنها حرکت شده است.

تحول ماشینها بخار پیستوندار، در همه انواع آن، هم‌زمان با به پایان رسیدن سدهٔ نوزدهم متوقف شد. چنانچه به گروههای الکتروژن که در سال ۱۹۰۰ پدید آمدند نظری بیفکنیم همچنین می‌توان ادعا کرد که این واپس‌نشینی، ماشینهای یک سیلندری را بی‌اعتبار ساخت.

گروههایی که در نمایشگاه سال ۱۹۰۰ درخشیدند: در واقع در نمایشگاه سال ۱۹۰۰ پاریس، ۴۸ گروه الکتروژن شرکت داشتند که تنها هفت گروه از آنها ماشین بخار یک سیلندری را به نمایش گذاشتند. قویترین آنها دارای ۳۰۰۰ kW (با ماشینی دارای انبساط چندگانه) بود درحالی‌که قویترین گروه ماشین یک سیلندری قدرتش از ۷۵۰ kW (یک چهارم قبلی) فراتر نمی‌رفت. دقیقاً همین گروه است که با ماشین کورلیس فارکو (ظاهراً هزار اسبی) کار می‌کرد و همان‌طورکه در پیش گفتیم جایزهٔ بزرگ نمایشگاه را ربود. این ماشین سیلندری با ابعاد ۱۰۰ × ۱۳۵ سانتیمتر داشت، هر دقیقه ۷۸/۵ دور می‌گردید. در فشار ۷ کیلوگرم و تنها با یک‌دهم بخار ورودی، قدرت اسمی آن به ۹۰۰ اسب می‌رسید.

در دوره‌ای که بررسی می‌کنیم موتورهای تا اندازه‌ای قوی عموماً دارای چند انبساط بودند. این امر نتیجهٔ تحولی بود که در مرحلهٔ نخست در ماشینهای بخارکشتی پدید آمده بود و ما آن را در صفحات آینده توضیح خواهیم داد. اما پیش از آنکه بررسی دتانت در سیلندر تکی را تمام کنیم باید خاطرنشان کرد که مهمترین اصلاحاتی که در این رشته انجام گرفتند و در بالا آنها را بررسی کردیم

1. Todd 2. Stumpf 3. Charlottenbourg 4. Erste Brünner Maschinenfabrik

۵. Brno شهری در چک‌واسلواکی، مرکز موراوی

دستاوردهای قطعی در این زمینه را تشکیل داده‌اند. مثلاً توزیع بخار با ابزار زبانه‌دار در ماشینهای مرکب دارای فشار زیاد به‌کار خود ادامه دادند درحالی‌که می‌توانستند کشو را جانشین آن سازند که برای ماشینهای دارای فشار متوسط ساده‌تر بود.

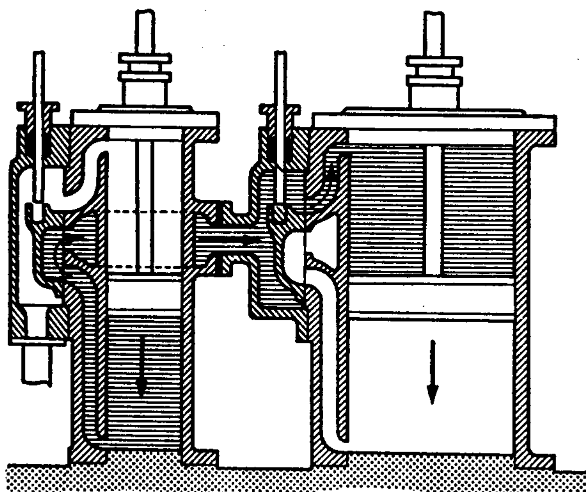
انبساط دو یا چندگانه

دتانت مرحله‌ای: حدود سال ۱۸۷۰ که فشار کاری دیگ بخار به ۸ اتمسفر و حتی بیشتر از آن رسید کاهش متناسب فشار بخار در یک سیلندر ناممکن شد. لازم آمد که این دتانت را با اجرای آن در سیلندرهایی که حجم آنها بتدریج زیاد می‌شود مرحله‌ای کرد ـ کاری که در آن‌زمان مدتها بود در ماشین بخار وولف انجام می‌گرفت. این روش انبساط دو یا چندگانه ـ بسته به تعداد سیلندرها ـ نامیده شد. بهتر است مزایای این کار ـ که بیشتر در دو سیلندر انجام می‌گیرد ـ به اجمال باز نموده شود.

مزایای دتانت مرحله‌ای: در ماشین بخار یک سیلندری، حداکثر کار با فشار بخار ورودی و سطح پیستون متناسب است و تغییرات آن در جریان حرکت پیستون، نسبت مستقیمی با درجهٔ دتانت دارد. در این محاسبه همه قطعات مسؤول در تغییر حرکت برای حداکثر کاری که باید تحمل کنند و علاوه‌برآن یک چرخ طیار بسیار سنگین را نیز باید در نظر بگیرند. این مسألهٔ تنظیم ضربهٔ موتور بدون شبهه دلمشغولی پیشگامان دتانت دوگانه بوده است. به‌هرتقدیر در سال ۱۸۲۰ در کتابهای مکانیک انگلیسی و فرانسه این امر به صراحت خاطرنشان شده است.

از سوی دیگر، مرحله‌ای شدن دتانت منجر به مرحله‌ای شدن کاهش دما بین دو مرحلهٔ ورود و خروج بخار می‌شود. یک آزمایش بسیار دقیق از شرایط کاری ماشین در آن زمان، کاهش محسوس اثر جدار را ثابت کرد. بدون اینکه وارد جزئیات کار شویم، تذکر می‌دهیم که در چنین حالتی مقدار اتلاف در کندانسور به سیلندر کم فشار محدود می‌شود، که این خود مزیت عمده‌ای است. همین ملاحظات، مثل دیگر مسائلی که به اثر جدار مربوط می‌شوند تا زمانی‌که فشار بخار زیاد نبود آشکار نبودند؛ اما، در اواخر سدهٔ نوزدهم و اوایل بیستم، بویژه در ماشینهای کشتی، در طرحهای ماشینهای دارای قدرت زیاد و با صرفه، بنوعی عامل اصلی تبدیل شدند.

دو علت اصلی که مانع شده بودند که در ماشینهای پیستوندار، از بخارهای دارای فشار زیاد، بدون مرحله‌ای کردن دتانت استفاده برند گفته شده علت دوم بیش از اولی اهمیت داشت. در موتور درونسوز نابرابری کار صریحاً پذیرفته شده است و در اینجا با تکثیر سیلندرها ـ بدون مرحله‌ای



شکل ۳۴.برش سیلندرهای یک ماشین وولف. فرار بخار از سیلندر کوچک و ورود آن به سیلندر بزرگ.

کردن دتانت ـ مشکل را دور زده‌اند. اما موتور درونسوز با گاز کار می‌کند، یعنی سیال الاستیکی که از دمای میعان خود بسیار دور است، درحالی‌که ماشین بخار، همان‌طورکه از نام آن برمی‌آید، از بخار استفاده می‌کند که به دمای میعان خود بسیار نزدیک است. تغییرات در حالتهای بینابینی برای چنین موتور پیستونداری، نوعی نقص مرتبط با این ساختمان است. تنها توربینهای بخار، با حذف کپسولیزم متناوب می‌توانند بدون اثر جدار باشند. و ماشین حرکت‌کننده با بخار را، حتی در دوران ماشینهای چهار انبساطی بسیار تکمیل شده، فراتر از حد گمان متحول سازند.

ماشین وولف: دربارهٔ ماشین وولف چند کلمه‌ای گفته شد، اما در اینجا دربارهٔ موفقیت روزافزون آن در فرانسه صحبت می‌کنیم (شکل ۳۴). در انگلستان، که این ماشین رواج کمتری داشت غالباً از روش به‌اصطلاح مک ناتینگ از نام مخترع آن مک ناتن[1] استفاده می‌شد. در این روش با افزودن یک سیلندر فشار قوی به ماشین وات، معمولاً در نقطهٔ مقابل شاهنگ، آن را مناسب کار خود می‌کردند.

ماشینهای مرکب: پیستونها، چه مانند ماشین وولف با هم یا مثل ماشین مک ناتینگ مقابل هم کار کنند، از نظر کار ماشین اهمیتی ندارد زیرا نقاط مرگ در هر دو مورد مطابق یکدیگرند. اما در ماشینهای به‌اصطلاح مرکب، که هنوز تاریخ آنها را بررسی نکرده‌ایم، این همزمانی حرکت پیستونها

1. Mc Naughton

دیگر وجود ندارد. دو لنگ این ماشینها با یکدیگر معمولاً زاویهٔ ۹۰ درجه دارند تا بهترین یکنواختی درکار موتور و نیز تسهیلاتی برای شروع حرکت در این یا آن جهت تأمین شده باشد. در نتیجهٔ این مکانیسم ورود بخار به سیلندر بزرگ در بخشی از مدت زمان خروج آن از سیلندر کوچک بسته می‌ماند و این حالت مستلزم وجود یک منبع واسطه بین دو سیلندر است. این ویژگیهای کاری مهم هستند و تمایز آشکار ماشین وولف از ماشین مرکب می‌باشند.

انبساط دوگانه در ماشینهای کشتی: همان‌طورکه به استحضار رسانیدیم، حدود تاریخ اختراع ماشینهای بخار کشتی بود که لازم آمد برای کمک به‌کار ماشین به فکر انبساط چندگانه آن باشند. پس از یک دورهٔ بسیار طولانی تحقیق و بررسی، حدود سال ۱۸۷۰ بود که ماشین مرکب درکشتیها رواج یافت. از آن پس کاربرد آن به ماشینهای ثابت و لوکوموتیوها نیز سرایت کرد، با این‌حال، در پایان این تحول موتور کشتی دارای سه یا حتی چهار انبساط شد.

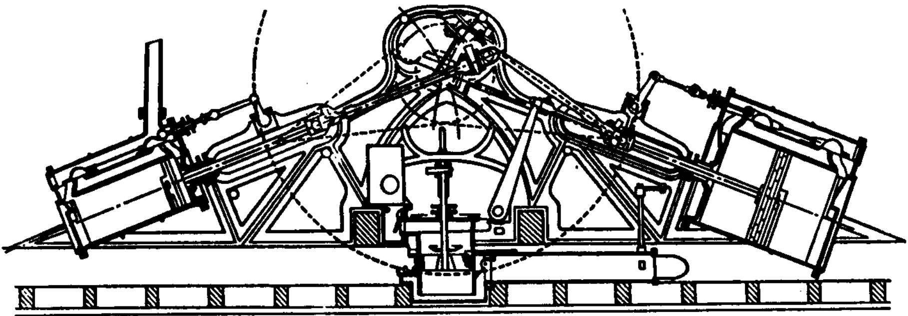
پیشاهنگی به نام گ. م. رونتگن: ماشین آقای گرارد موریس رونتگن هلندی که شایسته نیست وی را با کاشف اشعهٔ ایکس اشتباه کرد، در خور توجه بسیار ویژه‌ای است. برای اینکه از اهمیت این ماشین برآوردی داشته باشیم باید بگوییم که طی بیست سال پس از ۱۸۲۹ آقای رونتگن تعداد ۳۰ تا ۳۵ ماشین بخار دو انبساطی کشتی ساخت که همگی بخوبی کار کردند.

رونتگن از سال ۱۸۲۳ با آقای جان کاکریل به تشکیل یک شرکت هلندی کشتیرانی با ماشین بخار دست زد. کارگاههای آنان در ناحیهٔ فینورد[1] کنار رودخانه موز در بالا دست روتردام تأسیس شد. در سال ۱۸۳۴ بود که رونتگن توانست امتیاز مربوط به آرایش ۹۰ درجه‌ای لنگ و منبع واسطه را به‌دست آورد.

ماشینهایی که زیر نظر رونتگن ساخته شدند تقریباً همه مشخصات مشابهی داشتند. در آن زمان کشتیهای چرخدار متداول بودند و به‌همین دلیل سیلندرها در جهت طول بدنهٔ کشتی قرار داده می‌شدند (شکل ۳۵). نسبت حجمی این کشتیها ۳/۵ یا استثناً ۴ بود. فشار معمولی گویا ۵ اتمسفر بود. دیگهای بخار آنها از نوع استوانه‌ای با کورهٔ درونی یا از نوع دیگهای بخار لوکوموتیوها بود. نتیجهٔ کاربرد آنها نشانهٔ کیفیت خوب آنهاست. تعدادی از ماشینهای رونتگن در سال ۱۸۷۴ هنوز کار می‌کردند.

دورهٔ نوآوری: دههٔ ۱۸۶۰ ـ ۱۸۷۰ دوره‌ای است که طی آن ماشینهای بخار دو انبساطی به‌طور قطعی درکشتیها رواج یافتند. آقای آناتول ماله چنین می‌نویسد: «حدود سال ۱۸۶۰، تقریباً همهٔ راه‌حلهای مربوط به کاربرد انبساط دوگانه در ماشینهای بخار کشتی پیشنهاد و حتی بعضی از

1. Fijenoord



شکل ۳۵.ماشین رونتگن با انبساط دوگانه، ساخت ۱۸۳۷، برای کشتی چرخ دار
برش طولی بدنهٔ کشتی. محور زیرین ، کندانسور، تلمبهٔ هوا.
نقاط مرگ دو سیلندر، مطابق نیستند.

آنها هم در مقیاس کم‌وبیش مهمی به‌کار گرفته شده بودند. چیز مهمی برای اختراع نمانده بود، تنها می‌بایست از میان این راه‌حلها یکی را برگزید و کاربرد آن را عمومیت داد.»

این کار در این دهه انجام پذیرفت، زیرا افزایش قدرت موتورها نیاز به داشتن ماشینهای با صرفه را الزام‌آور کرده بود. اما این ضرورت بیشتر در مورد کشتیهای بخاری دریا و اقیانوس‌پیما حس می‌شد. در واقع «در زمین، صرفه‌جویی مربوط به مصرف سوخت تقریباً منجر به کاهش نهایی زغال سوختی شده بود، اما در دریا این صرفه‌جویی به نتایج بسیار مهمتری انجامید». چند رقم می‌توانند برآورد نسبتاً دقیقی از مزایای کاربرد موتورهای با صرفه در کشتیها را به‌دست دهند.

اهمیت اقتصادی انبساط دوگانه در کشتیها: برای نمونه یک کشتی اقیانوس‌پیمای پروانه‌دار متداول در سال ۱۸۶۵، نظیر کشتی *péreire* را بررسی می‌کنیم. این کشتی که بوسیلهٔ نپر در گلاسکو ساخته شده بود و به شرکت اقیانوس‌پیمایی تعلق داشت؛ ۵۰۰۰ تن ظرفیت آن بود و طی هشت روز یا ۱۹۲ ساعت مسافت ۲۵۰۰ میل دریایی را با سرعت ۱۳ گره می‌پیمود.

این کشتی مجهز به یک ماشین بخار با فشار متوسط و انبساط یگانه بود که ۳۵۰۰ اسب قدرت داشت که برای هر اسب ۲۵۰ کیلوگرم یعنی مجموعاً ۸۷۵ تن، وزن داشت. این ماشین «هر ساعت برای هر اسب ۱٫۶ کیلوگرم می‌سوزانید که برای همهٔ مسیر ۱۰۷۵ تن می‌شد. وزن کل موتور و سوخت ۱۹۵۰ تن بود که تقریباً ۴۰٪ ظرفیت آن می‌شد.

حال ببینیم که در صورت نصب ماشینی با همان قدرت اما دارای فشار بیشتر و انبساط دوگانه

که لزوماً همان‌طورکه خواهیم دید دارای کندانسور در سطح است ـ ، چه تغییراتی پدید می‌آید.

سرعت و در نتیجه مدت مسیر طی شده تغییری نمی‌کنند، چون قدرت آن ثابت مانده است. اما ماشین مرکب، تنها برای هر اسب در هر ساعت یک کیلوگرم می‌سوزاند. وزن آن برای هر اسب بیش از ۲۲۵ کیلوگرم نیست زیرا وزن دیگهای بخار متناسب با مصرف سوخت کاهش می‌یابد. بدین‌ترتیب، وزن ماشین، ۷۸۸ تن و سوخت آن ۶۷۲ تن است که کل آن از ۱۹۵۰ تن به ۱۴۶۰ تن تقلیل یافته است، یعنی ۴۹۰ تن کم شده است که حدود ۱۰٪ ظرفیت آن می‌باشد.

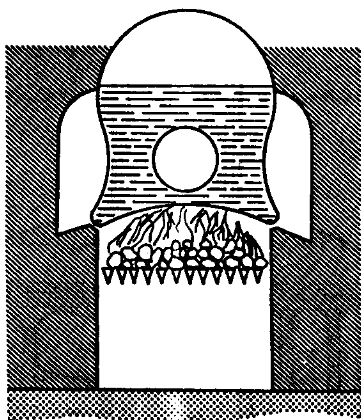
بر روی یک کشتی بازرگانی از این نوع با ماشین قدیمی که مربوط به کارکنان کشتی، مسافران و وزن مفید است بیش از حدود ۲۰٪ ظرفیت یعنی حدود هزار تن نیست؛ اما با ماشین جدید، این وزن مفید به حدود ۱۵۰۰ تن یعنی ۳۰٪ ظرفیت می‌رسد، به‌عبارت دیگر به وزن مفید ۵۰٪ افزوده شده است.

به‌جای کوشش برای اضافه کردن به وزن مفید، می‌توانستند برای افزایش قدرت کشتی کار کنند و، بنابراین، روی سرعت آن (عامل اخیر تقریباً به نسبت کعب قدرت افزایش می‌یابد). با نصب یک ماشین مرکب ۵۰۰۰ اسبی که برای هر اسب ۲۲۵ kg وزن دارد این دفعه، وزن ماشین ۱۱۲۵ تن است. می‌توان این وزن را پذیرفت، زیرا کافی است تا ۸۵۰ تن زغال بار بزنیم که برروی‌هم ۱۹۷۵ تن وزن کشتی می‌شود. در واقع ۸۵۰ تن کافی است زیرا در یکسو ما برای هر اسب در ساعت بیش از یک کیلوگرم نمی‌سوزانیم و از سوی دیگر سرعت ما به ۱۴/۷ گره دریایی رسیده است و مسیر ما لااقل ۲۲ ساعت، تقریباً یک شبانه‌روز طول کشیده است. صرفه‌جویی در سوخت نسبت به ماشین نخست، هنوز ۲۲۵ تن است.

کاربرد در انگلستان: نخست به جریان وقایع در انگلستان نظر افکنیم. نخستین کاربرد در سال ۱۸۵۴ بود، یعنی ۱۷ سال پیش از آنکه نیروی دریایی انگلستان تصمیم به کاربرد ماشینهای دو انبساطی در همه کشتیهای بخاری دریاپیما گرفت (۱۸۷۱).

ابتکار این اقدام را آقایان راندولف و الدر[1] ماشین‌سازان شهر گلاسکو و به شکلی خصوصیتر، آقای جان الدر مدیر این مؤسسه داشت، اما در سال ۱۸۶۹ پیش از آنکه موفق شود، مفقود گشت، نخستین کاربرد در سال ۱۸۵۴ مربوط به یک کشتی پروانه‌دار تجاری به نام برندون[2] بود. مصرف این کشتی برای هر اسب در ساعت از دو کیلوگرم به ۱/۵ کیلوگرم تقلیل یافت. از سال ۱۸۵۴ تا ۱۸۵۸ آقای راندولف والدر ۱۱۱ ماشین دو انبساطی با قدرت جمعی ۸۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ اسب برای کشتیها ساختند.

1. Elder 2. *Brandon*

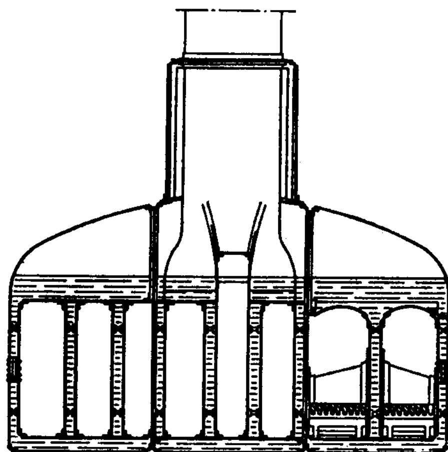


شکل ۵۱.دیگ وات با گربه‌روی داخلی.

همین‌که مسألهٔ فشارهای بالاتر پیشنهاد شد بدون هیچ پافشاری از میدان خارج شدند.

دیگهای کم‌فشار کشتی: شکی نیست که کاربرد دیگهای بخار کشتی با افزایش روزافزون فشار در آنها مستلزم اصلاحات بنیادی در ساختمان آنها بود. این وضع دقیقاً در نقطهٔ مقابل دیگهای لوکوموتیو بود که امکان بالا بردن فشار از ۳/۵ به ۱۵ و حتی ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع در آنها هیچ‌گونه الزامی در تغییر بنیادی ساختار آنها ایجاد نمی‌کرد. در یک کشتی بخاری، جا، مانند لوکوموتیو خیلی تنگ و محدود نیست و برای تحول امکان هست. با این‌همه، در کشتی، گرایش زیادی به کاستن وزن و حجم ماشینهای حرکت‌دهنده دیده می‌شود زیرا هر کاهشی با افزایش متناسب بار کشتی همراه است. در مورد دیگهای بخار، ما از دیگهای کم‌فشار سنگین و حجیم شروع کرده‌ایم و به دیگهایی رسیدیم که روزبه‌روز کوچکتر و سبکتر می‌شدند. این وضع از راه کاهش وزن آب محتوی دیگ است که دستاوردی بسیار بزرگتر از افزایش وزن فلز مقاومتر مورد نیاز خواهد بود.

دیگهای قدیمی‌ترین کشتیهای بخاری خیلی کم توصیف شده‌اند. مثلاً دقیقاً معلوم نیست که دیگ بخار کشتی کلرمون، نخستین کشتی بخاری فولتن چگونه بوده است. با این‌حال، در سال ۱۸۱۷ روشن شد که شکل مورد نظر، دیگ مکعب مستطیلی «وات» است که در نوعی که در بالا از آن سخن راندیم یک گربه‌رو فلزی داخلی دارد. آقای آناتول ماله می‌نویسد: «دیری نپایید که گربه‌روهای چهارگوش در دیگهای بخار با جدارهای موازی رواج کامل یافتند ... نوع دیگ



شکل ۵۲.دیگ بخار محفظه‌ای کشتی.

گر به‌روداری که در سال ۱۸۲۰ به‌طور قطعی مورد قبول قرارگرفت صندوقی به‌شکل متوازی‌السطوح با سقف گوژ بود که کوره‌هایی داشت که به گر به‌روهایی با مقطع چهارگوش راه داشتند. این گر به‌روها روی آنها خم می‌شدند و به دودکش وصل می‌شدند. از جمله این نوع دیگها، می‌توان از دیگ بخار بولتون و وات نام برد که بعداً همهٔ سازندگان دیگ بخار از آن تقلید کردند. مدت بیست سال دیگهای بخار کشتی همگی یا تقریباً همگی بر همین اساس، اما با تغییرات جزئی بسیار، ساخته می‌شدند» (شکل ۵۲).

ماشینهای کم‌فشار از وزن زیاد بخار استفاده می‌کردند و بزودی واحدهای تبخیر پرقدرتی شدند. آنها برای رسیدن بدین قدرت، از چندین کوره گر به‌رودار استفاده کردند، چندین ردیف گر به‌رو روی هم قرار می‌گرفتند، به این گر به‌روها شکل دوارهای طولی یا عرضی و یا حتی در جهت ارتفاع داده می‌شد. در کشتیهای بزرگ، چنین دیگ بخاری، دو یا سه کوره داشت. دیگهای بخار پهلوی یکدیگر ردیف می‌شدند و دیگ بخار محفظه‌ای نام داشتند. بعدها، دیگها را در دو ردیف چنان می‌گذاشتند که بتوانند پشت به پشت یکدیگر قرار گیرند و همگی یک دودکش داشته باشند؛ در این‌صورت نام «دورنما» به آنها داده می‌شد. برای افزایش باز هم بیشتر قدرت، به دودکشهای کشتی می‌افزودند.

برای نمونه، دیگهای کشتی گریت بریتن را که آقای برونل در سال ۱۸۴۲ ساخته بود بررسی می‌کنیم. قرار بود که مقدار بخار لازم برای ماشینی که ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ اسب قدرت و ۰٫۵ کیلوگرم

فشار داشته باشد تأمین شود. دو نما تهیه شد که هرکدام سه محفظه داشت که از کف به یکدیگر مربوط می‌شدند. هر محفظه دارای سه کوره، با پنجره‌ای حدود یک مترمربع بود که جمعاً حدود ۲۴ متر می‌شد. این مجموعه مسافتی در زمین برابر ۱۰ متر از هر طرف را اشغال می‌کرد و ۶٫۲ متر ارتفاع داشت. وزن فلز دیگها ۲۰۰ تن و مقدار آب آنها نیز ۲۰۰ تن بود. باید تذکر داد که برای چنین فشارکم ۰٫۵ کیلوگرمی، جدارهای صاف دیگ می‌بایست با میله‌های آهنی و آرماتوربندی مهمی تقویت می‌شدند. حال نسبتها و بازده دیگها را بررسی کنیم. مصرف معمولی سوخت در آن زمان عبارت بود از سه کیلوگرم زغال و بیست کیلوگرم بخار برای هر اسب اسمی، نسبتهای قابل‌قبول برای سازندگان آن نشان می‌دهند که این نوع دیگ بخار، حدود ۳۰ کیلوگرم در هر مترمربع سطح گرم‌کننده در هر ساعت تبخیر می‌کرد و آتشدان می‌توانست برای هر مترمربع در هر ساعت ۵۰ کیلوگرم زغال را بپذیرد. حدود یک مترمکعب بخارساز برای ۳۰ اسب نیرو لازم بود. وزن آن برحسب اسب حدود ۲۵۰ کیلوگرم بود و در مجموع ۱۵۰ کیلوگرم وزن فلز و ۱۰۰ کیلوگرم وزن آب بود که برحسب میزان قدرت دستگاه تغییراتی داشت.

این دیگهای غول‌آسا بسیار عالی بودند: مدت زیادی کار می‌کردند، نگهداری زیادی لازم نداشتند و تقریباً هیچ نشتی بخار در آنها دیده نمی‌شد. تمیزکاری آنها ساده و از راه دریچه‌ها انجام می‌گرفت. چون دمای آنها معتدل بود جرم آب در آنها نه زیاد و نه چسبنده بود. گردش آب بسرعت و به‌طورکامل انجام می‌گرفت. با آب دریا کار می‌کرد و برای اینکه مقدار نمک آن از اندازه قابل‌قبول تجاوز نکند منظماً نمک را تا حدودی از آب می‌گرفتند.

در وضع کشتیرانی آن روزگار، این طرز کار بسیار استثنایی بود و باید مکانیسم آن شرح داده شود. آب دریا حاوی معادل ۳٫۵٪ وزن خود املاح محلول است که ازآن میان ۲٫۶۵٪ آن کلرورسدیم و ۰٫۸۵٪ سولفاتها (بویژه سولفاتهای کلسیم و منیزیم) است. ماشینهای کم‌فشار برای هر اسب در هر ساعت به‌اندازهٔ ۲۰ کیلوگرم بخار مصرف می‌کردند و این مقدار، ۷۲۴٫۵ گرم نمک دارد که ۱۷٫۳۸۰ کیلوگرم بر ژول است. یک کشتی فرقت فرانسوی در سال ۱۸۴۲ برابر ۴۵۰ اسب قدرت داشت. قدرت واقعی ۹۰۰ اسب اسمی (با نشانگر وات اندازه‌گیری شده) بود. این رقم به‌معنای ۱۵۶۴۲ کیلوگرم نمک در روز یا حدود ۱۶ تن است. این ارقام به ما می‌گویند که یک دیگ بخار کشتی که از آب دریا استفاده می‌کند اگر دخالتی در آن نکنند پس از چند ساعت از کار باز می‌ماند. بنابراین جدا از آبرسانی، باید در فواصل زمانی معینی، زمانی‌که میزان نمکها به ۱۰٫۵٪ رسید، که سه برابر نرخ طبیعی است، نمکهای دیگ را برطرف ساخت. از این مطلب نتیجه گرفته

می‌شود که برای هر لیتر آب تبخیر شده باید ۰/۵ لیتر را خالی و در نتیجه ۱/۵ لیتر آب وارد کرد. چنانچه آب در دمای ۱۱۰°C تبخیر شود و دمای ورود آن به دیگ ۴۰°C باشد (آبی که در کندانسور است)، اتلاف گرما در نتیجهٔ استخراج آب، تنها ۵/۵٪ است که بسادگی می‌تواند با گرم کردن دوبارهٔ آب وارد به دیگ جبران شود.

بدین‌ترتیب، دیده می‌شود که دیگهای محفظه‌ای چگونه توانستند مدت سی‌سال رضایت کامل دارندگان خود را داشته باشند. آخرین مجموعه‌های مهم آنها در سالهای ۱۸۵۰ و ۱۸۵۴ برای شرکت کیونارد و رویال میل برای حرکت دادن آن عده از کشتیهای باری ساخته شدند که قدرتشان به ۸۰۰ اسب می‌رسید. فشار بخار از این پس به یک کیلوگرم بالا رفت که با این سیستم امکان‌پذیر نبود. در آن زمان سیستم تقویت دیگ (نبشیها، میله‌های تقویتی، قیدها) وزن معینی داشتند. دیگهای محفظه‌ای مانند دیگهای تابوتی، که منشأ آنها بودند، دربرابر انواع تازهٔ دیگهای پرفشار، بدون هیچ مقاومتی کنار رفتند.

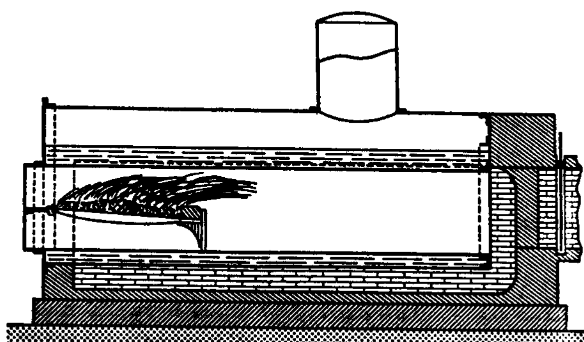
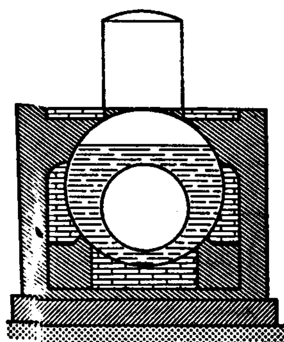
دیگهای با فشار متوسط

دیگهای استوانه‌ای: ما تا اینجا سه نوع دیگ بخار استوانه‌ای شکل را که تا پایان ماشینهای پیستوندار به‌عنوان دیگ بخار زمینی کلاسیک باقی ماندند بررسی کردیم. اینها عبارتند از: دیگ بخار کورنوال که کورهٔ داخلی دارد؛ دیگ بخار لنکشر که دو کورهٔ داخلی موازی دارد. این دو نوع دیگ در جهان آنگلوساکسون و آلمان کاربرد داشتند. سومین نوع،دیگ بخار با کورهٔ خارجی و دارای لوله‌های آب است که تقریباً منحصراً در فرانسه و مستعمرات آن به‌کار می‌رفتند.

این سه نوع دیگ در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم برای تولید بخاری که فشار آن در آن زمان بالا و در اواخر همان سده بسیار معتدل خوانده می‌شد، یعنی ۲ تا ۵ و به‌طورکلی ۳ اتمسفر، مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

در سالهای نخستین سدهٔ نوزدهم، زمانی‌که ترویثیک و اونز به ساختن ماشینی با «فشار بالا» در اصطلاح آن زمان، یعنی بیشتر از فشار اتمسفر همت گماشتند لازم آمد که گام بلندی جلوتر از دیگ بخار تابوتی، که تنها دیگ رایج زمان بود، برداشته شود. این دو نفر تقریباً به‌طور غریزی بدین فکر افتادند که تنها **شکل** مناسب دیگ، استوانه‌ای یا کره‌ای است.

دیگ بخار ترویثیک را می‌توان ساختهٔ سال ۱۸۰۳ یا ۱۸۰۴ دانست. بدنهٔ استوانه‌ای آن که نخست چدنی بود از جلو با صفحه‌ای که به ورق آهن پیچ شده بود، لوله‌ای به‌شکل «U» را که

شکل۵۳.دیگ کورنوال. مقطع طولی

شکل۵۴.دیگ کورنوال. مقطع عرضی.

کوره در آن جا داشت، به‌صورت پرچ‌شده با خود نگه می‌داشت. یکی از مزایای این نوع دیگ، سهولت سوار کردن آن بود.

آقای اونز در سال ۱۸۰۵ شکل استوانه‌ای را برگزید. حداکثر ابعاد مورد نظر ۱ و ۳ پا قطر و ۲۰ تا ۳۰ پا طول بود، تا استحکام کافی داشته باشد. این شکل مربوط به دو لوله متحدالمرکز است که لوله وسطی، کورهٔ ماشین بود. گازها از راه گربه‌رو پایینی برمی‌گشتند. دستگاه با پرچ کردن ورقهای آهن ساخته شده بود.

آقای اونز در همان تاریخ یک دیگ بخار استوانه‌ای با ته برآمده و کروی را شرح می‌دهد که مثل دیگ وات از بیرون گرم می‌شود. این نوع دیگها در نیمهٔ نخست این سده، بدون رواج زیاد، در کار بودند (**رجوع کنید به مجلد سوم، صفحهٔ ۹۸، شکل ۴۷**).

درباره دیگ دیگر اونز باید گفت که شکل آن درست شبیه دیگ کورنوال بود (شکلهای ۵۳ و ۵۴). دربارهٔ وجود اولیهٔ خاستگاه این دیگ، اطلاعات زیادی در دست نیست. تنها معلوم است که در سال ۱۸۱۲ وجود داشته است. بنابه گزارش یک کارگر ترویثیک، چنین دیگی در این سال در دالکوث[1] به‌جای یک دیگ وات نصب شده است. ابعاد آن چنین بود: طول، کمی بیش از ۹ متر؛ قطر، کمی بیش از ۱٫۸۰ متر؛ قطر کوره، کمی بیش از ۱٫۵۰؛ فضای بین بدنهٔ دیگ و پایین کوره، کمی بیش از ۱۵ سانتیمتر. دیگ دیگری شبیه آن در همان سال بوسیله ترویثیک ساخته شد و در ناحیهٔ ترویتن[2] در کورنوال کار گذاشته شد. این دیگ را می‌توان در ساینس میوزیم لندن دید.

اصراری نداریم که از سرنوشت دیگهای کورنوال، که بدون اصلاحات محسوسی، حدود یک

1. Dalcoath 2. Trewithen

سده کار می‌کردند اطلاعی به‌دست آوریم. بازده حرارتی این دیگها بسیار عالی بود اما سطح گرماده آنها نسبت به حجم دیگ زیاد نبود این دیگها نیز رفته‌رفته جای خود را در کارخانه‌ها به دیگهای دوکوره‌ای سپردند و دیگ بخار کورنوال عملاً در تلمبه‌خانه‌ها منزوی شد و در آنجا، دستگاههایی با همان نام را تغذیه می‌کرد. معلوم است که عمر این تأسیسات گاهی به یک سده رسیده است ــ و نیز برای بعضی صنایع جهت ایجاد گرما، بخار تأمین می‌کرد. بعضی از دیگهایی که برای این کار مورد استفاده قرار گرفتند تا زمان بین دو جنگ جهانی هم فعال باقی ماندند.

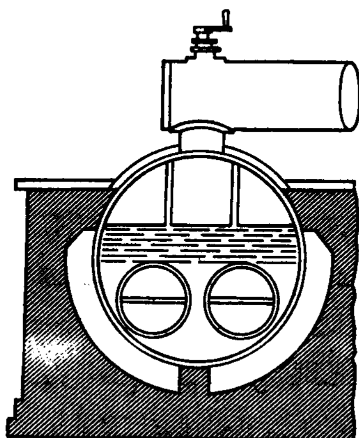
افزایش سطح تشعشع، هرجا که مورد نظر بود با نصب دو کورهٔ پهلوبه‌پهلو در بدنهٔ دیگ، حاصل می‌شد. دیگ لنکشر چنین وضعی داشت (شکلهای ۵۵ و ۵۶). این دیگ در سال ۱۸۴۴ بوسیلهٔ ویلیام فیربرن و جان هذرینگتن[1] از منچستر به ثبت رسید. فیربرن بعدها می‌گفت که در استفاده از دو کوره به‌هیچ‌وجه افزایش سطح تشعشع را در نظر نداشت، بلکه قصد وی، برعکس، متناوب کردن گرما در دو کوره برای جلوگیری از دوده بود. اما او فوراً متوجه شد که سیستم وی چه مزیت واقعی دارد. به‌هرتقدیر، این دیگ بیشترین اقبال را در انگلستان، جهان انگلوساکسون و در آلمان داشته است. کاربرد این دیگ بین دو جنگ جهانی، هنوز در کارخانه‌هایی که از ماشین بخار استفاده می‌کردند عمومی بود؛ اما این سیستم هرگز در فرانسه نفوذی نیافت، یا لااقل کاربرد آن بسیار کم بود.

آقای دیکینسون با طرح جدول جالبی با آوردن اندازه‌های تشعشع، مقایسه‌ای بین فضاگیری و گنجایش انواع دیگها می‌کند. تبدیل واحدها به یکدیگر بیهوده می‌نماید زیرا استفاده‌ای که از این ارقام می‌شود مقایسهٔ آنها با یکدیگر است.

چنانچه سطح تشعشعی برابر ۵۰۰ پای مربع مورد نظر باشد با دیگ بخار نیوکامن، گنجایش دیگ باید ۱۰۰۵ پای مکعب باشد و فضاگیری ۱۰۰۰۰ پای مکعب است. با دیگ بخار لنکشر گنجایش دیگ به ۴۰۴ پای مکعب کاهش می‌یابد و فضاگیری به ۲۷۰۰ پای مکعب. خود این ارقام گویا هستند.

دیگ بخار لنکشر: دیگ بخار لنکشر به‌علت کاربرد دیرپای و میل به افزایش فشار که در همان زمان ایجاد شده بود، دستخوش تحول فنی چشمگیری شد و آقای دیکینسون جزئیات آن را بررسی کرده است. ما فکر می‌کنیم که خوب است به‌دنبال وی این نوع تحول بدون تغییر شکل را بررسی کنیم. در اثر این تحول، دستگاهی در مقابل ما قد علم کرد که خصوصیات آن عمیقاً تغییر کرده بود. تاریخ‌نویسان نسبت به این تحولات در مقایسه با حوادث پرسروصدا، به چشم تحقیر می‌نگرند؛

1. Hetherington

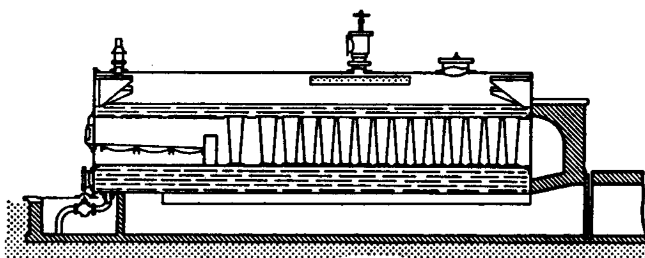


شکل ۵۵.دیگ لنکشر، نوع اولیه فیربرن ـ هذرینگتن (۱۸۴۴).

گرچه این حوادث هم همیشه مهم نیستند.

پیش از هرچیز باید از تغییراتی در مهارت کارگر سخن راند. در سالهای ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ می‌توان گفت که سازندگان دیگ بخار، دیگر آن را وسیله‌ای برای اینکه مهندس مکانیک شوند نمی‌دانستند.

لوله‌های داخلی، که استوانه‌های درازی بودند، در معرض شکستن بودند. خود آقای فیربرن در این‌باره آزمایشهایی کرد و در نقاطی از آن حلقه‌هایی برای تقویت گذاشت. بعدها برای جلوگیری از آن، سیستم جالبی را یافتند. در سالهای ۱۸۵۱ ـ ۱۸۸۵ انواع اتصالات برای تقویت استوانه‌ها



شکل ۵۶.دیگ لنکشر، نوع ۱۸۷۳ با لوله‌های گالووی.

ساخته شد. وسیلهٔ بسیار رایج دیگر، لولهٔ گالووی بود که آن‌هم در سال ۱۸۵۱ ساخته شد. این دستگاه شامل لوله‌هایی عمودی پر از آب بودند که از میان لوله‌های کوره می‌گذشتند. این لوله‌ها که نقش تقویت‌کننده داشتند سطح تشعشع را افزایش می‌دادند و جریان آب را سریع می‌کردند.

کوره‌های موجدار، طرح آقای سمسون فوکس[1] در سال ۱۸۷۶ خصوصیت مهمی داشت. در ابتدا برای ساخت آن ناچار از روش چکشکاری استفاده می‌شد. سپس در سال ۱۸۷۸ آقای شولتسه[2] و کناوت[3] استفاده‌کنندگان آلمانی این امتیاز، ماشین ابزار خاصی برای تولید آن ساختند. کوره‌های موجدار در کشتیها برای دیگهای بخاری که بعدها شرح داده خواهند شد بسیار رواج یافت.

نخست کف دیگ را وسیلهٔ یک نبشی به بدنه محکم می‌کردند. از سال ۱۸۵۶ برای افزایش مقاومت دیگ در فشار حدود هشت اتمسفر، آقای ادمسون[4] قطعات بدنهٔ دیگ را با ماهیچه‌های طولی و بدنه را با ته دیگ با بستهای آهنی، به‌هم متصل ساخت. باید گفت که نوع کف صاف با لبه‌های برگشته به بالا، که به توسط نبشی اتصال ایجاد می‌شد حدود سال ۱۸۶۶ اختراع شد. در مرحلهٔ آخر دیگهایی متداول شد که آنها هم محدب و هم با لبه‌های برگشته بود، که استفاده از ماهیچه‌ها و بست و نبشی را منتفی ساخت. این کار را آقای تامسن در سال ۱۹۰۵ رایج کرد.

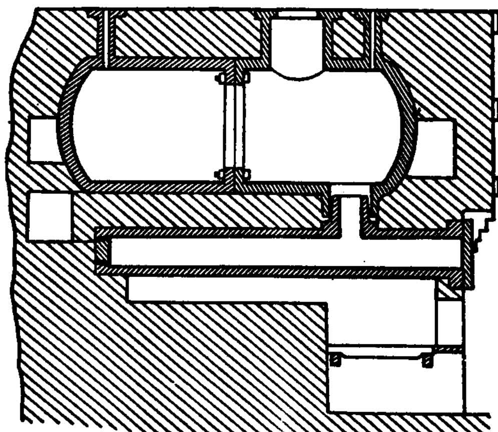
موضوعی که ناگفته مانده است مربوط به مصالح ساخت دیگ بخار می‌باشد. ورق فولادی در انگلستان در سال ۱۸۶۵ برای این کار مورد استفاده قرار گرفت. در این زمان چند سالی از اختراع روشهای نوین تولید فولاد گذشته بود؛ عدم اعتماد نسبت بدان قابل فهم است. شکی نیست که برای باور کردن بدان، گذشت زمان لازم بود.

از نظر روش ساخت باید گفت که قدیمترین طرز تولید دیگ بخار این بود که با تقه‌کاری در بدنهٔ دیگ سوراخهایی به‌وجود می‌آوردند و با دست، ضمائم را بدان پرچ می‌کردند. در سالهای ۱۸۷۰ بود که ایجاد این سوراخها با مته‌کاری و پرچ کردن نیز با ماشین انجام شد.

علت ماندگاری زیاد دیگ لنکشر این بود که به فشارهای بسیار بالا نیاز شدیدی احساس نمی‌شد و می‌توانستند به شرایط موجود، که همان‌طورکه در بالا توضیح دادیم پیوسته رو به کمال می‌رفت، خشنود باشند. بعداً فشارها آن اندازه بالا رفتند که از حدود دیگ لنکشر گذشتند، اما این وضع نیاز به فشارهای متوسط را از بین نبرد و این امر سبب شد که این نوع دیگ تا پایان عمر ماشینهای پیستوندار به‌کار خود ادامه دهد.

دیگ بخار لوله آبی (یا فرانسوی): جز بررسی خاستگاه دیگهای بخار لوله آبی، نوع متداول در فرانسه که همان اندازه در این کشور پابرجا ماند که دیگ لنکشر در کشورهای آنگلوساکسون، موضوع

1. S. Fox 2. Schulze 3. Knaudt 4. Adamson

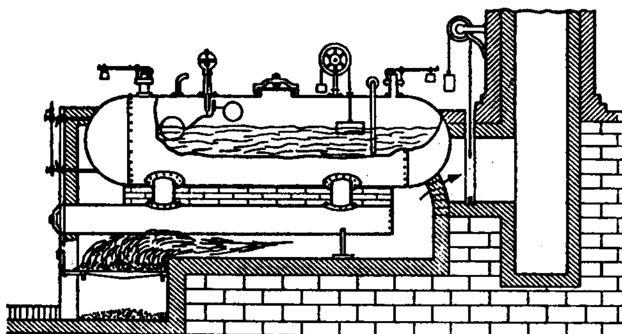


شکل ۵۷.دیگ بخار لوله آبی (فرانسوی)؛ مدل ادواردز، حدود ۱۸۱۵، چدنی.

دیگری از این مبحث نمانده است. این نوع دیگ بخار با بدنهٔ استوانه‌ای و کورهٔ خارجی در رایجترین شکل خود دارای دو لولهٔ آبی طویل در زیر بدنهٔ خود بود.

آقای وولف در نخستین سالهای این سده نوعی دیگ بخار پرفشار را به نمایش گذاشت این دیگ برای بخار دادن به ماشین با انبساط دوگانه ساخته شده بود و شامل یک بدنه استوانه‌ای و چند لولهٔ افقی آب بود. این لوله‌ها که در عرض گذاشته می‌شدند حدود یک دوجین بودند. این نمونه در بریتانیا موفقیتی نداشت اما آقای ادواردز در سال ۱۸۱۵ همراه ماشین وولف آن را به فرانسه آورد. تبلیغ این دیگ بزودی همه‌جا پراکنده شد (شکل ۵۷). آقای ادواردز در برههٔ پنج سال، مدل آن را کاملاً تغییر شکل داد: لوله‌های آب را در طول کار گذاشت و تعداد آنها بتدریج به دو لوله کاهش یافت اما قطر آنها به‌طور کاملاً چشمگیری بزرگ شد. این دیگ در آن زمان دیگ لوله‌دار کلاسیکی در فرانسه شد که آقای کریستین مدیر کنسرواتوار پیشه و هنر فرانسه در رسالهٔ مکانیک خود که در سالهای ۱۸۲۳ تا ۱۸۲۵ انتشار می‌یافت آن را توصیف کرده است. این دیگ در کتابهای فنی فرانسه تا اوایل سدهٔ بیستم همه‌جا دیده می‌شود(شکل ۵۸). انگلیسیها چندتایی از این دیگ را به‌کار گرفته‌اند و آن را دیگ فرانسوی یا «فیل دیگ» می‌نامیدند که با شکل آن بخوبی جور بود.

اضافه کنیم که در فرانسه دیگ به‌اصطلاح نیم لوله آبی ـ دیگ لوله آبی که بدنهٔ استوانه‌ای آن را دیگی با لوله‌های دودی تشکیل می‌دادند ـ رواج زیاد داشت و ما در آینده به بررسی آن می‌پردازیم.



شکل ۵۸.دیگ بخار لوله آبی (فرانسوی)؛ مدل کلاسیک، اواسط سدهٔ نوزدهم، از آهن ورق.

دیگ بخار لوله دودی برای لوکوموتیوها و برای کشتیها: ما یکبار دیگر به گفتار آناتول ماله باز می‌گردیم: «طبق طرحهایی که معمولاً دربارهٔ دیگهای لوله دودی انتشار یافته است، تاریخ پیدایش این دیگ می‌بایست با اختراع سال ۱۸۲۸ مارک سگن شروع شده باشد. اما ما گمان داریم که تاریخ پیدایش این دیگ زودتر از این باشد؛ زیرا چنانچه آقای سگن مطابق همهٔ شواهد، نخستین کسی باشد که دیگ بخاری از این مدل ساخته است طرح آن پیش از وی وجود داشته است. ابداع تقسیم کردن یک گربه‌رو با مقطع انحنایی به تعداد زیادی لوله‌های کوچک ـ بدین‌منظور که طبق یک اصل بسیار مشهور هندسی، سطح تشعشع به مقیاس زیاد بالا رود ـ آنچنان طبیعی است که حقاً نمی‌توان باور داشت که تا سال ۱۸۲۸، که نیاز شدید به داشتن یک دیگ بسیار قوی احساس شد، کسی به این فکر نیفتاده باشد. ما خواهیم دید که این طور نیست و مخترعان متعددی در آن زمان این فکر را داشته‌اند.»

ما هم بنوبهٔ خود به گفتهٔ بالا، نوشته‌ای از ژاک کنستانتن پریه را می‌افزاییم که بسیار قدیمتر از سگن بود زیرا به سال ۱۷۷۳ برمی‌گردد: «... تولید بخار زیاد با آتش کم را می‌توان با ساخت دیگی به‌دست آورد که مساحت زیادتری را در معرض آتش قرار دهد و برای این کار اجازه دهد که آتش از بین تودهٔ آب که در آن هست از راه لوله‌های زیادی که به‌عنوان دودکش کوره عمل می‌کنند بگذرد.»

بدون اینکه بخواهیم باز هم دورتر برویم، در سال ۱۷۹۳، اختراعی را که آقای جوئل بارلو، شاعر

و کنسول ممالک متحدهٔ امریکا در فرانسه به ثبت رسانید، پیش‌روی داریم. بارلو بوضوح لوله‌های آبی و لوله‌های دودی را پیش‌بینی کرده است، گرچه کمی به اشتباه، وی لوله‌های آبی را به‌شکل دسته‌ای توصیه می‌کرد و تنها به یک لولهٔ دودی مارپیچی می‌اندیشید، طرحی که مسألهٔ کشش را تقریباً حل ناشدنی می‌کرد؛ عاملی که در دیگهای لوله‌ای دودی اهمیت بسیار دارد.

بارلو را نمی‌توان به‌هیچ‌وجه تکنسین دانست، اما روشن است که وی میزبان آقای فولتن در پاریس بود و این آقای فولتن نخستین کسی است که دیگ بارلو را روی کشتی بخاری او سوار کرد. برپایهٔ دلایل بالا می‌توان پرسید که آیا بارلو به‌طور ساده نام مستعار فولتن نبوده است. ماله در این‌باره بررسیهایی کرد اما چیزی دستگیرش نشد.

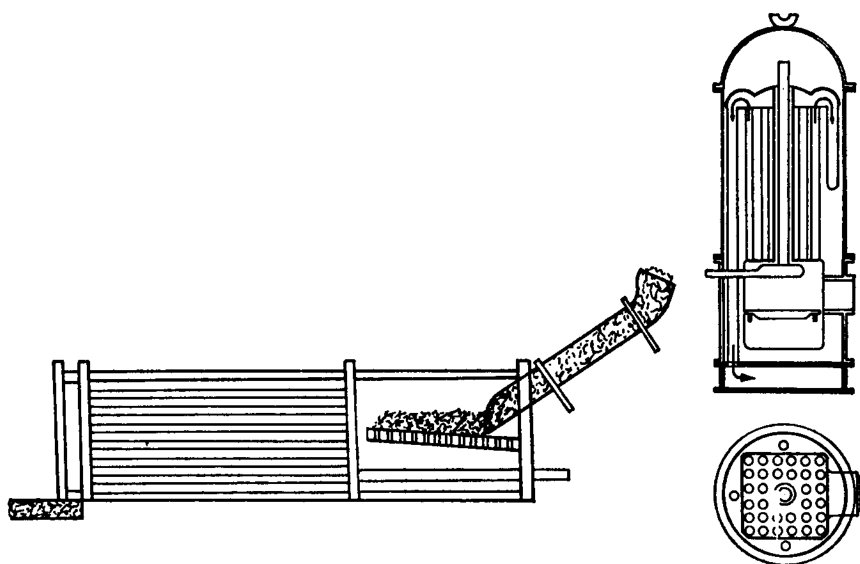
در سال ۱۸۲۱ آقای فیلیپ ژانژامبر بازرس قبلی ضرابخانه که مدیر کارخانهٔ اندره هم بود، اختراعی را دربارهٔ نوعی دیگ بخار عمودی دارای شش لوله به ثبت رسانید. پنج لولهٔ کوچک آن از کوره آمده بودند و یک لولهٔ بزرگ برای بازگشت بود. کورهٔ آن داخلی بود و مجموعهٔ کوره و لوله‌ها یک قطعهٔ جداشدنی را تشکیل می‌دادند. این همان کوره‌ای است که پس از گذشت ۳۵ سال بوسیلهٔ آقایان پرینیون با شرکت آقایان توماس و لورنس با موفقیت زیادی رواج یافت.

ما اینک به دورهٔ ساخت ماشینها نزدیک می‌شویم. واقعهٔ مهم این زمان اختراعی است که آقای جیمز نویل[1] انگلیسی در سال ۱۸۲۶ به ثبت رسانید. توضیح سیستم وی در سال ۱۸۲۸ در مجلهٔ *Newton's Journal* انتشار یافت (شکل ۵۹). در فرانسه در همان زمان باید از کارهای (کمی مقدماتی) آقای لگری[2] که سازندهٔ ماشینهای پیشنهادی بود یاد کرد. در نوشته‌های وی «در تودهٔ درهم‌وبرهمی از طرحهای بی‌قاعده و تقریباً غیرعملی، گاهی اندیشه‌های ارزشمندی می‌درخشند». رساله وی با عنوان *Nouvelle mécanique du feu* به تاریخ ۱۸۲۷، محتوی کروکی دقیقی از یک دیگ بخار لوکوموتیو همراه با توضیحات بسیار روشن است. کورهٔ این دیگ داخلی است (شکل ۶۰). این طرح به دیگ بخار کلاسیک لوکوموتیو بسیار نزدیکتر است تا دیگ سگن و حتی دیگ راکت.

با این دیگ به دوره‌ای گام می‌گذاریم که هر دو مرز آن، سگن و استیونسن برای لوکوموتیوها دیگ بخار لوله دودی ساخته‌اند. چگونه چنین اتفاقی افتاده است؟

در نیمهٔ دوم سال ۱۸۲۷ سگن در اندیشه ساخت نوعی دیگ بخار لوله دودی، قبل از همه برای کشتیهای بخاری خود در رون بود. وی در ۱۳ دسامبر نخستین اختراع خود را به ثبت رسانید. آزمایشهای وی در دسامبر ۱۸۲۷ و ژوئیهٔ ۱۸۲۸ انجام گرفتند. در ماه مه ۱۸۲۹ نخستین لوکوموتیو

1. J. Neville 2. Legrie



شکل۵۹. دیگ بخار لوله‌ای جیمز نویل.

شکل ۶۰.دیگ بخار لوله آبی لگری.

درحال ساخت بود. این لوکوموتیو در اول نوامبر برای نخستین بار مورد آزمایش قرارگرفت. در این بین، آقای سگن در ۱۶ اکتبر ۱۸۲۹ اختراع دوم خود را به ثبت رسانید ـ اختراعی که بویژه کاربرد دیگ بخار لوکوموتیوها و نیز استفاده از دَم را شامل می‌شد. اما چنین می‌نماید که برای اینکه این ماشینها واقعاً به‌کار گرفته شوند دو سال دیگر باید بگذرد (رجوع کنید به مجلد سوم، شکل ۹۹).

دربارهٔ جزئیات کارهای انگلیسیها روی این نوع ماشین اطلاع ما بسیارکم است. نتیجهٔ مسابقات رینهیل در آوریل ۱۸۲۹ منتشر شد. آزمایشهای مقدماتی لوکوموتیو راکت در اول دسامبر آغاز شد و آزمایشهای واقعی در ۶ اکتبر. بدون شبهه آقای هنری بوث دبیر لیورپول ـ منچستر کاربرد دیگ بخار لوله دودی را به استیونسن القا کرده است. اما روشن نیست که خود وی این اندیشه را از کی گرفته بود. رویهمرفته، این موضوع اسمیت اهمیت چندانی ندارد زیرا همان‌طورکه دیده می‌شود منابع اطلاعات ما در این‌باره روزافزون است.

در پایان این گفتار چیزی که ما می‌توانیم به داوری بسیار نافذ آقای آناتول ماله، این عالم بزرگ بیفزاییم، این است که: سگن نخستین کس بود که بدین اندیشه راه یافت ولی وی تنها یک دیگ بخَار لوله‌ای دودی ساخت؛ استیونسن دومین کس در این راه بود، اما وی یک دیگ بخار واقعی

لوکوموتیو ساخت.

با چند ملاحظهٔ فنی این ادعا را ثابت می‌کنیم. در دیگ بخار سگن، کوره در خارج دیگ است و گازها نخست از یک گر به‌رو خارجی می‌گذرند و از لوله‌ها فقط برای برگرداندن استفاده می‌شود. وانگهی سگن خود را تنها وقف این سیستم کرده بود، نه چیز پیشرفته‌تری. اما استیونسن، در دیگ بخار لوکوموتیو راکت وی، کوره مطمئناً در بیرون دیگ است، گازها مستقیماً از میان لوله‌های موازی می‌گذرند ـ کاری که پس از آن همیشه تکرار شده است. وانگهی در سال پس از ساخت پلانت، استیونسن کوره را در دیگ ادغام کرد، که مطمئناً دستاورد مهمی است (رجوع کنید به، مجلد سوم، صفحهٔ ۴۹۸ ، شکل ۹۸).

همان‌طورکه می‌بینید، مقایسه کارهای این دو مهندس، دشوار نیست. اضافه کنیم که تفاوتهایی که دیده می‌شوند و می‌توانند به ضرر سگن باشند ناشی از محیط نامطلوبی است که سگن در آن می‌زیست.

این را هم باید یادآور شد که دو نفر بدشانسی که در مسابقات رینهیل دیگ بخار لوله‌ای دودی خود را بخوبی آماده کرده بودند، از یکسو آقایان جان بریث‌ویت[1] و اریکسن بودند که لوکوموتیو ناولتی آنها پس از حادثهٔ کوچکی که برای دستگاه آبرسانی آن روی داد، از دور مسابقه خارج شد؛ دیگ بخار آنان یک کورهٔ کروی یک تکه داشت. از سوی دیگر آقای تیموتی هکوورث هم به‌علت اینکه ماشینش بسیار سنگین بود از دور مسابقه کنار گذاشته شد، اما وی بعداً تعدادی لوکوموتیو برای راه‌آهن استاکتن به دارلینگتن ساخته است.

تحولات بعدی دیگ بخار لوکوموتیوها در جهت افزایش قدرت هر واحد با درنظر گرفتن محدودیتهای الزامی از لحاظ جایگیری بود؛ زیرا عرض خط، هیچ تغییری نکرده بود. وانگهی فشار بخار دیگ نیز خیلی زیاد شد و ورق فولاد به‌جای ورق آهن به‌کار رفت. اما خارج از این عوامل، پس از دیگ بخار پلانت در ۱۸۳۰ تغییرات اساسی ایجاد نشد. در سراسر این دوران، استوانه‌های محتوی لوله‌های موازی دودی رایج بودند. یک سر استوانه به کورهٔ محتوی لایه‌های آب و جدارهای تقویت‌شدهٔ دیگ که روکش آن به بدنهٔ کوره مماس بود، راه داشت و سر دیگر به هود دیگ وصل بود و لوله‌ها در آن باز می‌شدند. همهٔ این اصلاحات در جزئیات کار بودند و آنچه که در بحث راجع به دیگ لنکشر گفتیم برای اینکه درکی از آنها داشته باشیم کافی است.

بنابراین، ما به بررسی مشخصات چند دیگ از دورانهای متفاوت بسنده خواهیم کرد. نخست آنچه را که به دو دیگ بخار سگن و استیونسن مربوط می‌شود مورد بحث قرار می‌دهیم. در دیگ

1. J. Braithwaite

سگن مشخصات زیر دیده می‌شوند: سطح پنجره‌ها، یک مترمربع؛ تعداد لوله‌ها ۴۳ عدد؛ سطح تشعشع ۲۳ مترمربع که ۱۶ متر آن مربوط به لوله‌ها می‌شود؛ قدرت تبخیر ۳۳ کیلوگرم در ساعت برای هر متر مربع با فشار ۱۳ اتمسفر؛ مصرف سوخت زغال‌سنگ برای هر کیلوگرم بخار تولید شده، حدود ۷٫۵ کیلوگرم است.

در ماشین استیونسن، سطح پنجره۰٫۵۶ مترمربع؛ تعداد لوله‌ها ۲۵ با سطح تشعشع ۱۳ مترمربع است که ۱۱ متر آن مربوط به لوله‌ها می‌شود؛ قدرت تبخیر آن ۴۰٫۵ کیلوگرم در ساعت برای هر متر مربع؛ با فشار ۳٫۵ اتمسفر و بالاخره مصرف زغال‌سنگ برای هر کیلوگرم بخار تولید شده، کمی بیش از ۵ کیلوگرم است.

دیده می‌شود که دیگ بخار استیونسن، اقتصادیتر است؛ درحالی‌که سبکتر نیز می‌باشد. مشخصات آن مربوط به ماشینی است که مناسب قطارهای سریع‌السیر سبک باشد. دیگ بخار سگن، قدرتمندتر است. این دیگ پیش‌نمونه دیگهای بخاری است که در آینده برای لوکوموتیو قطارهای باری به‌کار برده می‌شوند.

اکنون به لوکوموتیوهای دوران بعد که بیشتر کلاسیک هستند، می‌پردازیم.

مثلاً نوعی ماشین شش چرخ استیونسن ساخت که عنوان مسخرهٔ *Patentee* را گرفت. این نوع ماشین را همهٔ ماشین‌سازان انگلیسی و فرانسوی آن زمان ـ زمانی‌که در آن توسعهٔ کلی راه‌آهن آغاز می‌شد ـ می‌ساختند. به‌عنوان نمونه، مدل ساخت شارپس ـ رابرتس[1] را بررسی می‌کنیم. این مدل در سالهای ۱۸۴۰ رواج بسیار یافت. در آن پنجره‌ای وجود دارد بقدر یک مترمربع و سطح تشعشع ۵۳ مترمربع، دسته لوله‌های موازی شامل ۱۳۴ لوله با ابعاد متر ۲٫۵۴ × سانتیمتر ۴ بودند. وزن این ماشینها حدود ده تن بود. انواع این ماشینها از نظر روش کار هنوز تفاوتهای زیادی با یکدیگر نداشتند. بنابراین ارقام بالا مشخصات عمومی آنها هستند. در این دوران هنوز فشارسنج فلزی که به مشاهدات کمک کند وجود نداشت و اطلاع از فشاری که لوکوموتیوهای قدیمی تحمل می‌کردند دشوار است. شاید چهار یا پنج کیلوگرم و این مقدار با مقایسه با فشاری که در دیگهای ثابت بود، رقم معقولی به‌نظر می‌رسد.

حدود سال ۱۸۸۰ شش شرکت بزرگ فرانسوی ماشینهای سریع‌السیری داشتند که تفاوت آنها با یکدیگر چندان نبود؛ وزن آنها به‌طورکلی در حدود ۳۸ تا ۴۵ تن و سرعتشان ۶۵ تا ۷۵ کیلومتر در ساعت بود. دیده می‌شود که سطح تشعشعی دیگها از ۹۰ تا ۱۲۹ مترمربع بود و تعداد لوله‌ها بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ عدد. فشار کاری دیگ به‌طورکلی ۹ کیلوگرم بود. یک ماشین بخار قطار باری

1. Sharps-Roberts

در آن زمان کمی بیش از ۵۰ تن وزن و ۱۹۰ مترمربع سطح تشعشع ـ در پرتو لوله‌هایی با طول استثنایی ۵٫۳۶ متر ـ داشت. فشار گازی دیگ آن نیز ۹ کیلوگرم بود.

آندره شاپلون جدولهای بسیار جالبی از سطح پنجره و فشار کاری دیگهای سالهای ۱۹۰۷ تا ۱۹۳۵ تنظیم کرده است، که ما خلاصه‌ای از آن را در اینجا می‌آوریم

در سال ۱۹۰۷ سطح پنجره عموماً ۳ و استثناً ۴ یا ۵ متر مربع بود. فشار کاری دیگها ۱۶ و گاهی ۱۲ یا ۱۴ کیلوگرم بود.

در سال ۱۹۱۴ سطح پنجره‌ها عموماً از ۳ به ۴ یا ۵ مترمربع رسید، اما فشار کاری دیگ تغییر نکرد. در سال ۱۹۲۵ سطح ۴ یا ۵ مترمربع پنجره قاعده‌ای شد درحالی‌که سطح ۳ مترمربع هم در جاهایی بود. فشار کاری دیگ ۱۶ گاهی ۱۷ کیلوگرم بود؛ گرچه ۱۴ و ۱۲ کیلوگرم هم هنوز وجود داشت.

سرانجام در سال ۱۹۳۵، سطح پنجره همه‌جا ۴ یا ۵ مترمربع بود و از این حد فراتر نمی‌رفت؛ تنها در چند لوکوموتیو غول‌پیکر امریکایی با کورهٔ خودکار، سطح پنجره بیش از ۷ مترمربع بود. اما فشار کاری دیگ افزایش یافته بود. اکثر آنها ۱۶ تا ۲۰ کیلوگرم فشار داشتند که ۱۶ حداقل بود. فشار کاری یکی از دیگها ۲۵ کیلوگرم بود.

سال ۱۹۳۵ را می‌توان پایان تحول لوکوموتیوهای بخاری دانست. گرچه این نوع ماشینها سالهای زیادی پس از این تاریخ به‌کار خود ادامه می‌دادند اما بررسی آنها بیهوده است.

اکنون باید سخنی هم درباره داغ کردن بخار در لوکوموتیوهای بخاری بمیان آورد. این کار از سال ۱۸۹۸ که آقای اشمیت دستگاه داغ کردن خود را روی ماشینهای État پروسی به‌کار انداخت شروع و بعد بسیار رایج شد. دستگاه داغ‌کنندهٔ لوکوموتیو برخلاف دیگهای دیگر بخار همراه با دسته لوله‌های موازی است. بعضی از لوله‌های آن قطر زیاد دارند و یک لولهٔ بخار در داخل آن تشکیل حلقه‌ای شبیه تل سر می‌دهند. از پروفیلهای بسیار گوناگونی استفاده شده است تا انتقال گرما به بهترین وجه ممکن انجام گیرد.

دیگ بخار با برگشت شعله: دیدیم که چگونه دیگ بخار قدیمی کشتی که سطوح صاف داشت به پایان مقاومت خود رسیده بود. برای اینکه فشار بخار را باز هم بیشتر کنند نخست می‌بایست از کوره‌های استوانه‌ای استفاده شود و برای اینکه سطح تشعشع آنها بالاتر رود دسته لوله‌های موازی آن را برگشت دادند. یک دیگ بخار از نوع لنکشر را درنظر بگیرید که روی یک دیگ بخار لوله دودی قرار دارد و دود آن از عقب به جلو کشیده می‌شود، همه آنها در یک محفظه قرار دارد؛ چنین

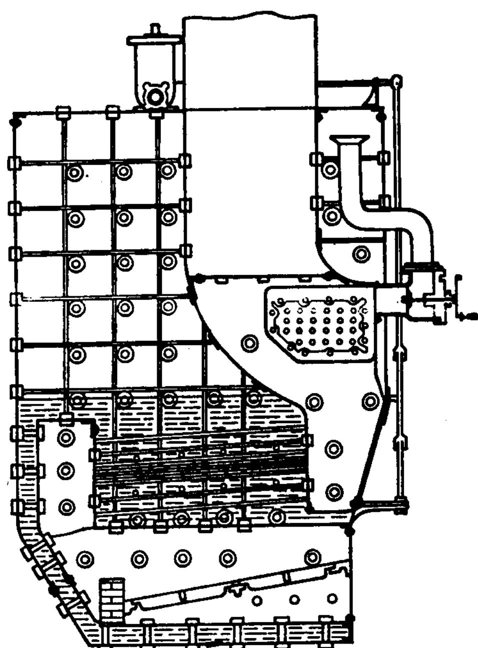
سیستمی دیگ بخار کشتی با فشار متوسط، معروف به دیگ بخار با برگشت شعله است. محفظه درکل، محافظ سطوح صاف است اما ضمناً به بعضی از بخشهای خود، شکلهای هلالی می‌دهد که منجر به پایداری خاص آنها می‌شود (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحهٔ ۴۶۱، شکل ۸۷).

مآخذ چنین دیگی زیاد شناخته شده نیستند. استیونز در سال ۱۸۳۲ در ممالک متحدهٔ امریکا آن را به‌کار گرفته است. جان بورن انگلیسی نیز از طرف دیگر ادعا داشته است که در سال ۱۸۳۸ برای اولین بار آن را ساخته است، اما چنین می‌نماید که در حقیقت وی طرح آن را داشته است نه ساخت آن را. از آقای سیوارد[1] هم نامی برده می‌شود که در بالای کوره‌های دیگ بخار کشتی خود به نام *Topaze* در سال ۱۸۳۹ یک دسته لوله‌های موازی کار گذاشته است. از سوی دیگر ویلیام و جان نپر در سال ۱۸۳۲ چنین دیگهایی ساختند و آن را به دریاداری انگلستان پیشنهاد کردند، البته همان‌طورکه عادت این سازمان بود پاسخ منفی بدانان داده شد. نامی هم از کشتی هلندی به نام *Batavia* برده می‌شود که در سالهای ۱۸۳۹ ـ ۱۸۴۰ ساخته شد و چنین دیگ بخاری داشت.

امری که قطعی است این است که در سال ۱۸۴۶، یعنی زمانی‌که آقای جان بورن که شهرتی به‌هم رسانیده بود دربارهٔ ماشینهای کشتی رساله‌ای انتشار داد، دیگ بخار با برگشت شعله کلاسیک شده بود. نخستین کاربردهای مؤثر چنین دیگی در انگلستان به سال ۱۸۴۳ در کشتی *Terrible* با قدرت اسبی ۸۰۰ اسب برمی‌گردد که ماودزلی آن را ساخته بود و نیز در سال ۱۸۴۴ درکشتی باری *Great Western*، یکی از نخستین کشتیها اقیانوس‌پیما، بود. دیگهای بخار این کشتی، که نخست محفظه‌ای بودند با دیگهای دارای دو شعله برگشتی تعویض شدند. قدرت این ماشین، رسماً ۴۰۰ اسب بود.

در سال ۱۸۵۲ ناوهای جنگی انگلستان و فرانسه جز دیگهای لوله‌ای از دیگهای دیگری استفاده نمی‌کردند (شکل ۶۱). در ممالک متحدهٔ امریکا در عوض تا مدتی به سیستم لوله‌های قطور، یا گربه‌روهای مدور چندگانه، که نمی‌توان نام گروه لوله‌های موازی بدان نهاد، دلبسته بودند. این سیستم، مجهز به روکشی مدور، گاهی تجاوز از فشار ۲ کیلوگرم را، بویژه درکشتی بخاری فولتن III در سال ۱۸۵۱ ممکن می‌ساخت. در اینجا از روی دیگهایی که بعداً پدید آمدند با سرعت می‌گذریم. در فرانسه یک کشتی بخاری پیشاهنگ به نام *Comte d'EU* برای کارهای شخصی لویی فیلیپ در سال ۱۸۴۶ ساخته شد. مشخصات نوع معمولی کشتیهای فرانسوی معروف به فشار بالا با اجاق طویل و فشار پایین با اجاق کوتاه در سال ۱۸۵۶ رسماً تعیین شد.

1. Seaward



شکل ۶۱.دیگ بخار کشتی با برگشت شعله، بدنه با سطوح صاف، مقطع طولی.

دیگهای با برگشت شعله، مشخصات زیر را داشتند: سطح پنجره ۲/۵ مترمربع و برای هر اسب رسمی ۲/۳ مترمربع سطح تشعشع بود. وزن دیگ برای همین واحد قدرت ۱۴۰ تا ۱۶۵ کیلوگرم بود که بسیار کمتر از دیگهای لوله دودی بود. از این وزن ۹۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم به فلز آنها و ۵۰ تا ۶۵ کیلوگرم به آب آنها مربوط می‌شد.

دیگ اسکاتلندی: به‌کارگرفتن دیگهای پرفشار یک دورهٔ به‌اصطلاح ماقبل تاریخی دارد ـ دوره‌ای که سال ۱۸۲۰ آغاز آن است. اینها ردیفی از کشتیهای بخاری رودخانه‌ای بودند که به دیگهای پرفشار و بدون میعان ـ کشتیهای سگن در رودخانه رون ـ مجهز شده بودند.

این کشتیها بانی پیدایش دیگهای ویژه‌ای نبودند. در کشورهای آنگلوساکسون از دیگهای نوع ترویثیک و اونز استفاده می‌کردند، که شرح آنها داده شد. در فرانسه از سال ۱۸۲۵ برای همین کار از دیگهای لوله آبی فرانسوی استفاده می‌شد. کاربرد این دیگها در کشتیهای رودخانهٔ سن حدود

سی سال ادامه یافت. سرانجام به دیگهای کم‌وبیش شبیه دیگهای لوکوموتیو روی آوردند.

اما در عوض در دریاها، زمانی‌که استفاده از فشار زیاد متداول شد، دیگ بخار با برگشت شعله، مانند دیگ قبلی، اما با روکشی کاملاً استوانه‌ای رواج کامل یافت و همه آنها با نام دیگ اسکاتلندی شهرت داشتند. در نوع جدار صاف این دیگها با وجود تقریبی که در روکش آنها اعمال می‌شد، تحمل فشار بیش از چهار یا پنج کیلوگرم را نداشتند. اما وضع داخلی کوره‌های استوانه‌ای و لوله‌ها برای برگرداندن شعله هیچ تغییری نکرده بود. دو سطح جلو و عقب، صاف باقی ماندند و با بستهای محکم به‌هم متصل می‌شدند. این مجموعه در بدنه‌ای استوانه‌ای شکل جا داده شده بود. هودهای عقب با لایه‌ای از آب، مانند سیستم قبل، احاطه شده بود؛ هودهای جلو، که مدخل دودکش بودند، در خارج قرار داشتند و از ورقهای نازک آهن ساخته می‌شدند. معمولاً مخازن استوانه‌ای برای بخار که دو طرف آنها گرد بودند این مجموعه را کامل می‌کردند.

در سالهای ۱۸۹۰ تا ۱۹۱۰ در کشتیها تنها از این نوع دیگ استفاده می‌شد. در ۱۹۶۰ دیگهای از نوع لوله آبی با آنها سهیم شدند.

نمونه‌های اولیه این دیگها در کجا بودند؟ در اینجا هم اندیشه پیش از ساخت و کاملاً مستقل از آن بوده است. دیگ بخار اسکاتلندی در سال ۱۸۳۸ در ثبت اختراع فرانسه به اسم کلود دوکلو[1] آمده است اما با ابعادی بسیار کوچک و برای دیگهای نیم ثابت. چنین دیگی پنجاه سال پس از آن تاریخ با نام دیگ باصرفه، به‌طور مؤثری کار می‌کرده است.

نخستین کاربرد آن گویا مربوط به سال ۱۸۴۵ در کشتیهای بخاری Halfpenny Steamboat روی رودخانهٔ «تمز» می‌شود. هود عقب آن بد طراحی شده بود، شکل شبکلاهی داشت که تنها با یک بست به برجستگی دیگ متصل شده بود. در سپتامبر ۱۸۴۷ در اثر درهم شکستن کوره، انفجار وحشتناکی ایجاد شد. پس از این جریان می‌توان از دیویس انگلیسی و پرینیون فرانسوی در رابطه با چنین دیگ بخاری نام برد. آقای پرینیون سیستم کورهٔ جداشدنی را که خود وی طرح کرده بود به این دیگ افزود. در این سالها طرح استفاده از چند کورهٔ موازی هم پیشنهاد شد.

پاسخ بدین پرسش که در چه تاریخی این نوع دیگ بخار در کشتیهای دریاپیما گذاشته شد، بسیار دشوار است. کاربرد این دیگ در کشتیهای دریاپیما در ثبت اختراعات سال ۱۸۴۵ انگلستان به نام پیتر بوری[2] و در ثبت اختراعات سال ۱۸۵۰ فرانسه نیز با نام وی آمده است. شرح دیگهای وی در ۱۸۵۲ منتشر شده است، کوره‌های این دیگها تخم‌مرغی بودند. در یک اختراع ثبت شده در فرانسه مربوط به سال ۱۸۵۸، در مورد دو آتشه کردن بخار، و در زیر نام پاتریج از اهالی لندن،

1. Cl. Duclos 2. P. Borrie

دیگی که معرفی شده بود از نوع اسکاتلندی است.

گروهی می‌گویند علت این نامگذاری، کاربرد آن در سال ۱۸۶۲ در کشتیهای *Velasquez* و *Murillo* بوسیلهٔ آقای راندولف الدر[1] از گلاسکو بوده است. اما آقای اسکات راسل همین دیگها را در سال ۱۸۶۵ توصیف می‌کند بدون اینکه آن را اسکاتلندی بنامد. آنها هنوز محتوی چند جزئیات اشتباه‌انگیز می‌باشند که بعداً از بین رفتند، مانند کوره‌های تخم‌مرغی و غیره. کار آنها را خوب ارزیابی کرده‌اند.

در همین زمان از دیگ ماشین بخار یک کشتی توپدار سخن رفته است که آقای فرستادیوس[2] سوئدی در سال ۱۸۶۲ در نمایشگاه لندن آن را به نمایش گذاشته بود. فشار کاری این دیگ تنها چهار کیلوگرم بود. دو سال پس از آن، در ۱۸۶۴ بنژامن نورمن همان نوع دیگ را با ورق فولاد برای کشتی بخاری فرانسوای اول خود ساخت. درگذشته این کشتی از دیگ نوع لوکوموتیو استفاده می‌کرد.

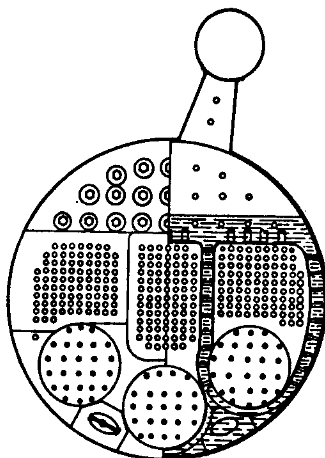
از ۱۸۶۴ تا ۱۸۶۷ روی رودخانهٔ دانوب تقریباً ۵۰ کشتی متعلق به آقای اندرئه[3] با دیگهای تخم‌مرغی یا کروی در رفت‌وآمد بودند. یکی از آن کشتیها دارای شش کوره با ۱۰٫۲ مترمربع پنجره و ۲۸۴ مترمربع سطح تشعشع بود.

کوششهای آقای کلاپارِد فرانسوی از سن ـ دنی در همین زمان بود. در جریان نمایشگاه سال ۱۸۶۷ وی یک دیگ بخار کشتی توپدار را با فشار کاری پنج کیلوگرم به نمایش گذاشت. تعداد دیگری از انواع دیگها روی لنجهای مخصوص نیروی دریایی در کار بودند.

در سالهای ۱۸۶۸ ـ ۱۸۷۰ کاربرد دیگ اسکاتلندی در فرانسه و انگلستان متداول شد. در انگلستان در سال ۱۸۶۸ کشتی *Head Quarter* را آقای ایتکین[4] از گلاسکو به دیگ اسکاتلندی مجهز ساخت. این دیگها دو کوره به قطر یک متر و ۳۷۴ لولهٔ ۷۵ میلیمتری داشت. قطر لوله‌ها ۳٫۲ متر و طول آنها ۲٫۴ متر بود. در فرانسه، کشتی فرقت *Reśolue* آقای کلاپارد نخستین کشتی مهمی بود که از آن استفاده کرد. فشار کاری دیگ چهار کیلوگرم باقی ماند. وزن دیگ برای هر اسب ۱۲۰ کیلوگرم بود که ۸۰ کیلوی آن فلز و بقیه را آب تشکیل می‌داد. بهره‌دهی این دیگ نسبت به دیگهای دارای فشار متوسط با جدارهای صاف معمولی، جالب بود.

دیگ بخار اسکاتلندی در جریان تحولات بعدی خود دستخوش تغییرات اساسی نشد، اما در شکلهای گوناگونی ساخته شد. نمای آن ساده یا دوگانه بود. قطر آن به ۵٫۲ متر هم بالغ شد و طولش به ۳٫۷ متر برای نمای ساده و ۶٫۵ متر برای نمای دوگانه رسید. تعداد کوره‌ها ۲ یا ۴، با قطر

1. R. Elder 2. Frestadius 3. Andreae 4. Aitkin



شکل ۶۲.دیگ بخار اسکاتلندی. چپ: نیم‌برش از نما؛ راست: نیم‌برش از عرض.

۰٫۸ تا ۱٫۱ متر بود. در سال ۱۹۰۸ فشار کاری دیگ تا ۱۵ کیلوگرم هم بالا رفت و این به‌دنبال معمول شدن انبساط چندگانهٔ بخار بود.

روشن است که چنین دستاوردهایی تنها به برکت ورق فولاد و حل چند مسألهٔ فنی مهم امکانپذیر شدند. هرگز ظرفهایی با چنین گنجایش و تحمل فشار ساخته نشده بود. ضخامت جدار دیگ تنها متناسب با تحمل فشار بخار آن نبود، بلکه به قطر آن‌هم بستگی داشت. هرچند فشارهای بسیار بالا تا زمانی‌که دیگ ابعاد کوچکی داشت آسان ایجاد می‌شد اما در دیگهای بخار با فشار بسیار کمتر هم دشواری فراوان است. مثلاً نویسنده‌ای در سال ۱۸۸۸ بدشواریهای ساخت دیگ بخار ۴٫۵ متری که تحمل تنها ۱۰ تا ۱۲ کیلوگرم فشار را دارد اشاره می‌کند. برای فشار کاری در این حد، باید از ورقهای فولادین به ضخامت ۳۰ تا ۳۲ میلیمتر استفاده شود: «کار کردن با ورقهای فولادین دارای این ضخامت، بسیار دشوار است و برای اینکه در جریان کار کردن روی آنها، ترد و شکننده نشوند، با وجود وسایل قدرتمندی که صنعت در اختیار دارد، باز باید نکات بسیار فراوانی را مراعات کرد» (شکل ۶۲).

طبیعی است که در اینجا هم از امکانات تکمیل جزئیات، که در مبحث دیگ بخار لنکشر با

آنها آشنا شدیم استفاده شود: روکش دیگ از قطعاتی ساخته شده که با لبه‌های بالا آمده به‌شکل رگه به یکدیگر وصل شده‌اند؛ کوره‌ها نیز حالت رگه‌ای و بعد مواج دارند. با این‌حال، در اینجا به پایان یک تحول می‌رسیم. برای اینکه از پله‌های فشار بالا برویم باید به دیگ بخار لوله آبی برسیم که همهٔ مزایا را در خود دارد: کاهش وزن آب و کاهش ضخامت جدار دیگ به‌علت کاهش قطرها.

دیگهای لوله آبی

دیگهای لوله آبی مبحثی است که توضیح آن ساده نیست. این دشواری چندین علت دارد. از یک دید سطحی، این سیستم همچون بختکی از لوله‌هاست که کم‌وبیش شبیه یکدیگرند. کسی که درپی آگاهی بیشتر از آنهاست با مانع دیگری برخورد می‌کند: همه می‌دانند که یک اختراع ندرتاً یک مخترع دارد؛ اما در این مورد تعداد افراد مورد بحث به دهها می‌رسد. بالاخره دوران اقدامات کورکورانه هم در این‌باره به‌طور استثنایی طویل بوده است.

باید کوشید تا معلوم شود که چرا این وضع اتفاق افتاده است، زیرا علت آن، چه‌بسا بتواند در اینکه مسأله را درست‌تر مطرح کنیم تا اندازه‌ای کمک کند.

قبل از هرچیز باید گفت که خود اندیشه گرم کردن آب با تقسیم کردن حجم آن در تعدادی از لوله‌ها، قدمت چندانی ندارد. نویسندگانی که در این‌باره رأی زده‌اند با یادآوری اینکه در پمپئی نوعی آبگرمکن به‌شکل آتشدانی محیط بر لایه‌ای از آب یافت شده است، برای این ادعا ایراد می‌کنند. نکته جالب برای ما این است که پنجره این آتشدان از لوله‌هایی است که آب در آنها آزادانه جریان دارد. درهرصورت از اواخر سدهٔ هجدهم عملی‌کنندگان طرح پیوسته در فکر دیگهای لوله آبی بوده‌اند. اما در نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم است که بیش از پیش تجهیزاتی ساخته می‌شوند که مستعد کار کردن هستند و تنها در سدهٔ بیستم است که این سیستم به رواجی که برای سیستمهای دیگر بی‌سابقه بود دست می‌یابد.

توضیح این امر در دشواری بسیار زیاد ساخت آن است، اما در عوض، امتیازاتی دارد که در سیستمهای دیگر یافت نمی‌شود. باید گفت که این امتیازات، تنها در فشارهای بالا آشکار می‌شوند. بدین‌ترتیب طبیعی است که پیشرفت سیستم لوله آبی تنها، زمانی صورت گیرد که بالا بردن پیوسته فشار، الزامی شده باشد.

در واقع دیگ بخار لوله آبی برای حجمهای کم‌آب، سطح تشعشع زیادی ایجاد می‌کند؛ از مدتها پیش بدین خاصیت پی‌برده بودند؛ اما ازسوی دیگر همان‌طورکه گفتیم لوله‌های کم قطر

دربرابر فشارهای بالا استحکامی بیشتر از لوله‌های بزرگتر نشان می‌دهند. بنابراین یک دیگ بخار لوله آبی، با اینکه وزن چندانی ندارد می‌تواند در فشار بالا کار کند و از سوی دیگر اگر انفجاری رخ دهد چون خطری که ایجاد می‌شود با مقدار آب دیگ متناسب است، در حالت فوق میزان خطر بسیار کاهش می‌یابد. در این امتیاز چنان غلو شده است که از دیگهای انفجارناپذیر سخن می‌رانند.

اگر جنبهٔ ساخت بسیار دشوار آن را مورد بررسی قرار دهیم می‌بینیم که این دشواری به‌وجود فشار وابسته است. مشکل پرچکاری قطعات، جوش دادن آنها، بویژه در لوله‌سازی وجود دارد، رشته‌ای که تا آن روزگار مورد بررسی قرار نگرفته بود. لازم بود که از آب‌بندی درزهای فراوانی اطمینان داشت؛ می‌بایست برای خنثی کردن آثار انبساطهای نابرابر، که نیروی آن تقریباً غیرقابل مقاومت است، راهی یافت. ناگزیر باید آزاد کردن سریع بخار تولید شده، تمیزکاری قطعات و بالاخره تأمین جریان داشتن آب را، که در چنین دیگهایی بیش از هرچیز اهمیت دارد، پیش‌بینی کرد. فراهم ساختن این مقتضیات متضاد کار دشواری است. مثلاً سهولت تمیزکاری ممکن است به آب‌بندی زیان برساند و . . . این دلایل سبب شدند که ساخت دیگهای لوله آبی تا سالهای پایانی سدهٔ نوزدهم، در ردیف خوابی خوش باشد.

ما گفتیم که از یک دید سطحی، دیگهای لوله آبی همگی با یکدیگر کم‌وبیش شبیه می‌باشند. نیازی به گفتن ندارد که این ادعا هیچ پایه‌ای ندارد، اما تفاوتهای آنها با یکدیگر زیاد آشکار نیستند و تا اندازه‌ای شبیه وسایل برقی هستند که مدارهای کاملاً متفاوت با یکدیگر، ظاهر یکسانی دارند.

می‌توان سه طرزکار مختلف مربوط به سه نوع ساخت دیگهای لوله آبی را از یکدیگر تشخیص داد:

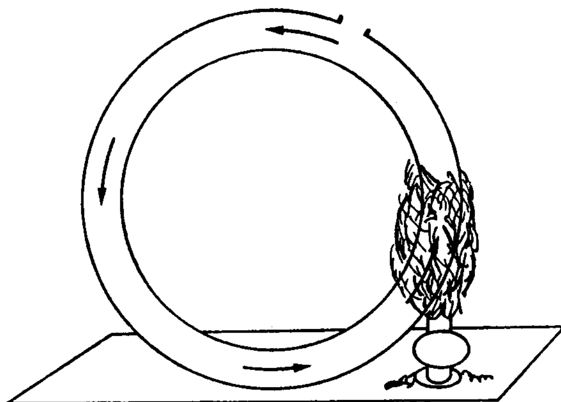
۱) دیگهای دارای جریان بسته یا با لوله‌های مارپیچی، با آبرسانی از پایین، که بخار در بالای آن جمع می‌شود. تنها جریانی که آب دارد برای جانشینی آبی است که بخار شده است. مشهورترین نوع آن، دیگ بخار ژولین بل‌ویل[1] است که هم در زمین و هم در کشتی کار می‌کند.

۲) دیگهای دارای جریان آزاد یا با لوله‌های تقریباً افقی که از هر دو سر به لایه‌های آب باز می‌شوند. مشهورترین نوع آن، دیگ بخار ببکوک اند ویلکوکس است؛

۳) دیگهای دارای جریان شتابنده یا با لوله‌های تقریباً عمودی، که به مخازن افقی واقع در بالا و پایین دیگ متصل هستند. مشهورترین نوع آن، دیگ بخار استرلینگ است که در خشکی کار می‌کند و دیگهای دوتامپل[2]، نورمن، تورنیکرافت[3] و یارو[4] هستند که مخصوص کشتیها هستند.

این را هم اضافه کنیم که بسیاری از پژوهشگران دربارهٔ نوع جریان آب نظر صریحی ندارند و

1. J. Belleville 2. Du Temple 3. Thornycroft 4. Yarrow



شکل ۶۳.آزمایش گورنه دربارهٔ تبخیر آب در لوله‌ها و جریانی که ایجاد می‌کند.

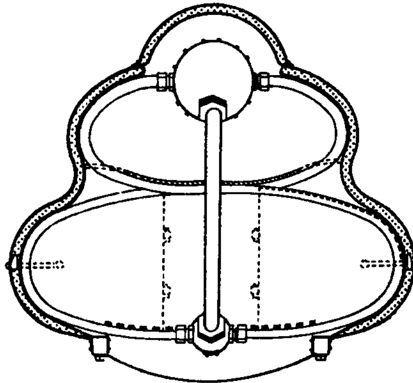
بنابراین آنها می‌توانند سیستمهایی را پیشنهاد کنند که گاهی هم موفق هستند. مطالبی که تا کنون گفتیم در طول زمان منجز شده‌اند و حال‌آنکه دیگهای بخار در همان زمان وجود داشتند.

ما اینک به بررسی تاریخ دیگهای لوله آبی، حتی‌المقدور در گذر زمان دست می‌زنیم.

گورنه؛ ساختهای نخست: برای شروع مطلب، ازکارهای گورنه شروع می‌کنیم، شخصی که در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم، بسیار افسانه مانند بود. آقای گورنه یک تبعهٔ انگلیس از ناحیهٔ کورنوال بود که در جوانی با آقایان ترویثیک و گیلبرت آشنا شد. وی در ۱۸۳۲ پزشکی را رها ساخت تا به بررسی کالسکه‌های دارای دیگ بخار بپردازد و برای این کار در لندن مقیم شد. گورنه به آزمایشی مقدماتی دست زد که باید آن را شرح داد زیرا در زمینهٔ مورد بحث تأثیر قطعی داشته است.

یک لوله شیشه‌ای حلقه مانند پرآب را در نظر بگیرید. این لوله در بخش فوقانی خود سوراخی دارد و در یک صفحهٔ عمودی است. پایین این لوله ـ در ربع پایینی آن ـ را گرم می‌کنیم. همین‌که آب گرم شد در جهت بالا جریان می‌یابد و نیمه محتوی لوله به گردش می‌افتد. همین‌که غلیان ایجاد شد این پدیده به‌علت سبک شدن وزن مخصوص آب در اثر حضور حبابهای بخار، شدت می‌گیرد. حبابهای بخار از سوراخ بالا بیرون می‌روند، اما دستگاه تا زمانی به‌کار جریان دادن آب ادامه می‌دهد که مقدار آب محتوی آن برای پر کردن بخش بالایی حلقه کافی باشد (شکل ۶۳).

آقای گورنه در سالهای ۱۸۲۵ و ۱۸۲۸ اختراعاتی را به ثبت رسانید که در آنها خطوط اصلی دیگهای بخار با جریان شتابنده دیده می‌شود: دسته‌های لوله‌های موازی تبخیرکننده، جمع‌کننده



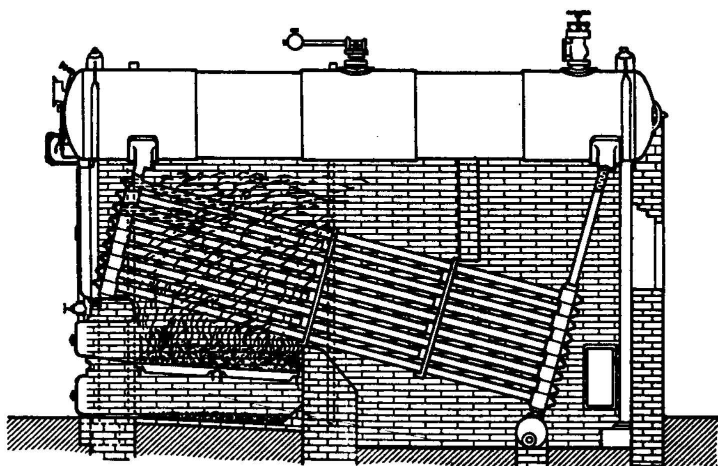
شکل ۶۴.یکی از انواع دیگ بخارهای گورنه، حدود ۱۸۲۵ برای اتومبیلهای دیگ بخاری. بالون جمع‌کنندهٔ بخار در بالاست و لولهٔ عمودی سقوط آب در وسط.

بالایی و پایینی بخار، لوله‌های برگشت آب به پایین در خارج از کوره. دستگاه وی شباهت خاصی به دیگهای تندکار آتش کشتیها داشت و با فشار معمولی پنج کیلوگرم کار می‌کرد. کالسکه‌های وی آزمایش خوبی دادند. او در مدت چهار ماه حدود ۳۰۰۰ مسافر را در مسافت کلی ۴۰۰۰ میل، بدون کمترین حادثه جابه‌جا کرد (شکل ۶۴). سرعت معمولی این کالسکه‌ها در هر ساعت ۱۰ میل بود، اما گاهی حداکثر ۳۰ میل هم وجود داشته است. همه می‌دانند که کالسکه‌های بخاری نمی‌توانستند در انگلستان دوام آورند زیرا مقررات خزانه‌داری که در حمایت از وسایل حمل‌ونقل وجود داشت تنها راه‌آهن را مقرون به‌صرفه می‌ساخت.

دیگهای امریکایی (ببکوک اند ویلکوکس ۱۸۶۷): دیگهای دارای جریان آزاد این امتیاز را داشتند که لوله‌های آنها نسبت به افق، کمی مایل بودند. این دیگها تبار امریکایی داشتند. ازجملهٔ این دیگها می‌توان از دیگ بخار توی‌بیل[1] در سال ۱۸۶۵ نام برد که لوله‌های آن به‌طور عرضی کار گذاشته شده بودند و دو سر آب جنب یکدیگر قرار داشتند. اما دیگ ببکوکس و ویلکوکس است که در سکوی قهرمانی ایستاده است، دیگی که اکنون پس از گذشت یک سده هنوز خدمت می‌کند.

پیدایش نخست این دیگ به امتیازی مربوط می‌شود که آقایان ویلکوکس و استیلمان در سال ۱۸۵۶ به نام خود ثبت کردند. در آن زمان لوله‌های این دیگ به‌طور مایل گذاشته شده بودند و دو سر آنها از طریق مخزن استوانه‌ای آب در بالا به یکدیگر مربوط می‌شدند و آنها را سرهای آبی

1. Twibill



شکل ۶۵.دیگ ببکوک اند ویلکوکس.
جریان آب از راست به چپ و با بالا رفتن در لوله‌ها به‌سوی گرمترین منطقه کوره است.

می‌نامیدند که هنوز شکل نهایی خود را نیافته بودند و در آن زمان به‌صورت لایه‌های یکپارچه‌ای ساخته می‌شدند. موفقیتهای دیگ ببکوکس و ویلکوکس (ثبت نهایی امتیاز در ۱۸۶۷) اصلاحات اساسی را با خود داشت. هر ردیف عمودی لوله‌ها از این پس دارای جعبه‌های ارتباطی ـ در هر سر، یک جعبه ـ خاص خود بود (شکل ۶۵). این تجزیهٔ لوله‌ها، خطر از شکل‌افتادگی آنها را در اثر انبساط بیمه می‌کرد.

دیگهای ببکوکس و ویلکوکس که درکاربردهای زمینی همه‌جا دیده می‌شدند، جز چند استثنای محدود در هیچ کشتی به‌کار گرفته نشد. سیستم جریان آزاد آب آن به اشکال مشابهی در تعدادی از کشتیها مورد استفاده قرارگرفت. در فرانسه بررسیهای لازم در این‌باره در سال ۱۸۶۹ درکارخانهٔ اندره بوسیله آقای ژوسل[1] و نیز در کارگاه دیگ بخارسازی آله[2] در همان زمانها انجام گرفت و به ساخت چندتایی انجامید. دیگهای فرانسوی، سرهای آبی را یکپارچه نگاه می‌داشت درحالی‌که ببکوک اند ویلکوکس از این کار ابا داشتند. چند شکست در این کار وجود داشت که احتمالاً با این روش ارتباط داشتند.

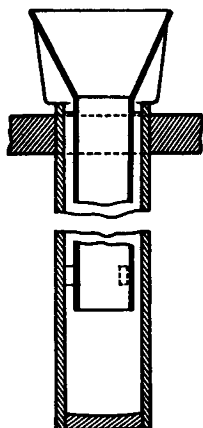
1. Joessel 2. Allest

در مورد سیستم با جریان آزاد آب می‌توان از یک مدل بسیار بدیع سخن راند، سیستمی که با نام لولهٔ فیلد، دیگ بخار کولت و دیگ بخار نیکلائوس[1] شهرت یافته است. در این سیستم یک سر لولهٔ تبخیرکننده بسته است و داخل آن، لولهٔ باریکتری قرار دارد که آب از آن وارد می‌شود و خارج شدن آن در جهت مخالف از یک منطقهٔ انحنایی انجام می‌گیرد. در واقع آقای پرکینز، پیشاهنگ فشارهای بسیار بالا در آن زمان این طرح را داشت و آن را در سال ۱۸۳۱ در انگلستان به ثبت رسانید. ده یا بیست سال پس از آن، دیگهای بسله[2] به بازار آمدند که در اصول شبیه بقیه‌اند. امتیاز فیلد از سال ۱۸۶۲ بود و دربارهٔ جزئیات ساخت توضیح داده است (شکل ۶۶). نویسنده بویژه دربارهٔ دیگهای کوچک و تا اندازه‌ای قابل حمل فکر می‌کرد. در فرانسه، آقای کولت و پس از وی آقای نیکلائوس در سالهای ۱۸۹۰ ـ ۱۹۱۰ در دیگهای مهم با اجرای مونتاژ به‌روش ببکوک اند ویلکوکس ـ یعنی برای هر ردیف از لوله‌های عمودی یک جمع‌کننده ـ لولهٔ فیلد را به‌کار بردند. اما این جمع‌کننده، دوگانه بود و دو محفظهٔ موازی داشت یکی برای جریان فرودی که به لوله‌های مرکزی کوچک با نام لوله‌های هدایت‌کننده، وصل می‌شد و محفظهٔ دیگر، جریان آب مخلوط با بخار را که از مناطق حلقوی می‌آمد به بالا هدایت می‌کرد. سیستمی عالی بود اما تمیزکردن و بویژه تخلیهٔ آن بسیار دشوار؛ و بنابراین تدریجاً از میان رفت.

دیگ بل‌ویل (۱۸۷۷)، دیگ سرپوله(۱۸۸۶): دیگ بخار بل‌ویل نوع کامل دیگ بخار دارای جریان بسته است. این را هم باید اضافه کرد که مدتها این دیگ استثنایی باقی ماند. تنها دیگی که همراه با آن نام برده می‌شد، دیگ بخار بنسن[3] به تاریخ ۱۸۵۸ است. دیگ بنسن متشکل از دسته‌های زیگزاگی لوله که از پایین آب وارد آنها می‌شد و در یک مخزن خارجی سرریز می‌کرد، گویا در ممالک متحده، به‌عنوان دیگ زمینی رواج بسیار یافت.

دربارهٔ دیگ بل‌ویل باید گفت که هم در زمین و هم در کشتی به‌کارگرفته می‌شد. آقای ژولین بل‌ویل که گویا در سال ۱۸۹۶ زنده بوده است اختراع خود را در سال ۱۸۵۰ به ثبت رسانیده است (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۱۲۰ شکل ۶۱). وی در سالهای اولیه بتنهایی به فکر به‌کار گرفتن لوله‌های مارپیچی پیوسته مانند بنسن بود. او برای رسیدن به طرح نهایی خود می‌بایست ۲۷ سال دیگر کار می‌کرد. در طرح نهایی وی هر واحد از دو ردیف عمودی لوله‌های راست و کوتاه تشکیل می‌شد که روی هم قرار داشتند و با بستهایی با یکدیگر تشکیل یک مارپیچ را می‌دادند. آب از پایین وارد لوله‌ها می‌شد اما با گذر کردن از مخزن بالایی، تا سر حد تبخیر گرم شده بود. این کار ضمناً باعث رسوب کردن نمکهای نامحلول می‌شد که در ظرف مخصوصی پیش از مارپیچها جمع می‌شدند.

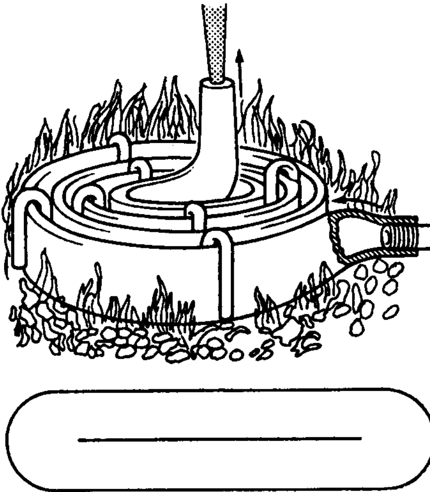
1. Niclausse 2. Beslay 3. Benson



شکل ۶۶.لولهٔ فیلد، کوره را باید حدود پایین شکل در نظر گرفت و دهانهٔ لوله‌ای که در آب شناور است در بالای صفحهٔ حامل لوله‌ها. آب از قسمت خارجی لوله در آن می‌ریزد و درحالی‌که با بخار آمیخته شده است از لولهٔ دوم متحدالمرکزی که درون لولهٔ نخست قرار دارد بالا می‌رود.

مسافتی که نمکها طی می‌کردند در دیگهای بزرگ تا ۴۰ متر هم می‌رسید، که خود دربرابر حرکت بخار، مقاومت می‌کردند. دیگ بخار بل‌ویل در ربع نخستین سدهٔ بیستم در نیروگاههای برقی هنوز به‌کار می‌رفتند اما با مدار دو مارپیچی تکمیل شده بودند و از این پس هر واحد دو مدار نصفی کوتاهی را تشکیل می‌داد و فرار بخار آسانتر شده بود.

تاریخ کاربرد دیگ بل‌ویل درکشتیها نیز با سالشمار مشابهی همراه است. آزمایشهای نخستین در سال ۱۸۵۶ روی کشتی *Biche* و بعد در ۱۸۶۱ روی *Argus* و *Sainte-Barbe* با لوله‌های پیوسته عملی شد. حدود سال ۱۸۶۶ درکشتی بازرگانی *Vienne* وکشتی تندروی *Actif* و توپدار *Hirondelle* لوله‌ها شکل کنونی خود را به‌دست آورده بودند. برای کرجی تفریحی *Oriflamme* متعلق به دوپویی دولوم که قدرت ماشین آن می‌توانست به ۱۰۰۰ اسب تکامل یابد بل‌ویل دو دیگ به‌دنبال هم ساخته بود: ۱۸۶۹ و ۱۸۷۲ ، اما باز با موفقیتی برخورد نکرد. او تا زمانی‌که مدل سال ۱۸۷۷ خود را نساخت از پا ننشست. این دیگ در ۱۸۷۸ روی کشتی *Voltigeur* کار گذاشته شد و این نقطه شروع رواج دیگهای وی حتی در نیروی دریایی انگلستان بود. تا پایان سدهٔ نوزدهم دیگهای بل‌ویل بیشترین کاربرد را داشتند گرچه حدود ده سال برای دیگهای با جریان آب شتابنده آزمایش کرده بود.



شکل ۶۷.دیگ سرپوله، نمایهٔ این دیگ.
در پایین: مقطع عرضی.
لوله‌های باریک، تشکیل مارپیچ را داده‌اند.

دیگهای تندکار، آخرین نوع دیگهای با جریان بسته هستند. در واقع دیگهای تندکار به طورکلی محتوی آب نبودند. ظرفی گرم شده بود که تلمبهٔ آبرسانی با هر ضربهٔ پیستون، مقداری آب دقیقاً لازم برای تبخیر بدان وارد می‌کرد. آقای جیکوب پرکینز در دهه ۱۸۲۰، که در ساخت دیگهای پرفشار پیشاهنگ بود دست به‌کار آزمایشهای دنباله‌داری برای ساخت چنین دیگهایی شد، اما زمان ساخت آنها هنوز نرسیده بود. شصت سال بعد وضع کاملاً دیگر شده بود. در سال ۱۸۸۶ بود که آقای سرپوله امتیاز خود را برای نوع دیگری دیگ تندکار به ثبت رسانید. دیگ وی لولهٔ درازی بود که با نورد، مسطح شده بود «به‌طوری‌که تشکیل دو صفحه با فاصلهٔ بسیارکم را می‌داد». موفقیت این دیگ فوری بود (شکل ۶۷). خود آقای سرپوله سرش گرم ساخت وسایل راهپیمای بخاری بود و بمنظور ساخت چنین وسیله‌ای به اختراع این نوع دیگ توفیق یافت. طی بیست سال این دیگ کاربرد فراوانی یافت اما، همان‌طورکه معلوم است، موتورهای دیگ بخاری نتوانستند در برابر موتورهای انفجاری پایداری کنند.

دیگهای با جریان شتابنده خطاهای راونها (۱۸۵۸ـ۱۸۷۵): سخنی که مانده است درباره دیگهای دارای جریان شتابنده است. این نوع دیگ از گروه لوله آبی است و پیشرفت آن در سالهای اخیر بوده است. این دیگ را آقای گورنه، مبتکری زودرس ساخته است. ما کارهای روانها را، که همین منظور را بدون رسیدن بدان دنبال می‌کردند شرح دادیم. موفقیت در ساخت چنین دیگی سرانجام با آقای دوتامپل[1] و ادامه‌دهندگان راه وی بود.

آقایان راون، پدر و پسر: جان مارتین و فردریک جان، برای ایجاد فشارهای بالا در دیگ بخار کشتی، به آزمایش دیگهای لوله آبی اشتغال داشتند. آنان و همکارشان آقای هورتن مورد اعتماد آقای اسکات[2] مدیر کشتی‌سازی گرینوک[3] بودند. وی مدت پانزده سال با آنان همکاری کرد.

جان مارتین راون در سال ۱۸۵۵ با به‌دست آوردن امتیازهایی که در سال ۱۸۴۰ آقای گرادوک[4] به ثبت رسانیده بود کار خود را شروع کرد. نخستین دیگ ساخت وی ۲۵۰ اسب قدرت داشت و با ۸ کیلوگرم فشار کار می‌کرد. این دیگ که در کشتی *Thétis* کارگذاشته شد در سال ۱۸۵۸ به اتمام رسیده بود. اطلاع دقیقی از این دیگ در دست نیست. بدون شک با ثبت اختراع سال ۱۸۴۶ آقای گرادوک مطابق بود، لوله‌های تبخیر در ردیفهای عمودی کارگذاشته شده بودند. این نوع دیگ که «از نظر سوخت به صرفه بسیار نزدیک و ساخت آن نیز آسان بود. متأسفانه لوله‌های آن پس از دوازده ماه کار کردن در جاهایی که بیشتر در معرض شعله بود سوختند و در نتیجه با نشتی شدن آنها تأثیر آتش کم شد». معنی این عبارت این است که جریان آب ناقص یا هیچ می‌شد. بدین‌ترتیب این اولین دیگ، بد بود و بین گرادوک و راون نقاری پدیدار شد که نتیجه در سال ۱۸۷۵ از یکدیگر جدا شدند. پس از این جریان آقای هورتن با راون شریک شد. دیگهای نوع *Thetis* بناچار در سال ۱۸۶۱ با ماشین دو انبساطی و کندانسور سطحی کنارگذاشته شدند. آنها در سال ۱۸۶۹ نوع دیگری دیگ بخار را به ثبت رسانیدند. این دیگ همیشه لوله‌هایش عمودی و مخازن بخار آن در بالا و پایین بود وگاهی هم مخازن بینابینی داشت که درست در بالای آتش قرار داده می‌شد و دقیقاً یک دیگ بخار لوله آبی بود. این مکانیسم ظاهراً اقبالی نداشت. در سالهای ۱۸۷۰ ـ ۱۸۷۲ تعداد زیادی از کشتیها با این نوع دیگ مجهز شدند که پنج فروند از آنها در هند، آبهای بنگال رفت و آمد داشتند. فشار کاری دیگ آنها ۱۰/۵ کیلوگرم بود. بعضی از این دیگها مدت ۶ سال فعال بودند.

ماشین بخار بسیار مهمی نیز در سال ۱۸۷۴ ساخته شد و در یک کشتی پروانه‌دار ۲۰۰۰ دور می‌گردید به نام *propontis* کارگذاشته شد. این ماشین نخستین واحد سه انبساطی بود که در

1. Du Temple 2. Scott 3. Greenock 4. Graddock

کشورهای آنگلوساکسون ساخته شد. هر دستگاه شد. هر دستگاه سه مخزن پایین، دو بینابینی و دو مخزن بالا داشت و آب از پایین وارد آن می‌شد. فشار کاری دیگ ۹ کیلوگرم بود. این‌هم شکست دیگری بود. پس از یک سال کار، این دیگها کاملاً سوراخ‌سوراخ شدند و لوله‌های آنها را می‌بایست تجدید می‌کردند. سپس در سال ۱۸۷۵ به فاصلهٔ چند روز طی ماه سپتامبر، دو مخزن بینابینی ترکیدند. علت این امر نابرابری قطر لوله‌هایی بود که قسمتهای مختلف دیگ را از بالا و پایین به یکدیگر مربوط می‌ساختند، که نتیجه آن تخلیهٔ ناقص مخازن بود. به‌علت مرگ چند نفر در اثر این ترکشها این دیگها کنار گذاشته شدند. نتیجه این حوادث، تأخیر ده ساله در تکمیل دیگها با جریان شتابنده بود.

این حادثه مهلک، خود سیستم را مورد سؤال قرار نداد. اما دیده شد که این دیگها، حتی بدون اینکه حادثه‌ای آفرینند در حد نفی‌کننده‌ای می‌سوختند یا سوراخ می‌شدند. علت این امر نرسیدن آب به سطح مخزن بالایی بود. آقایان راون از اصل جریان داشتن، چیزی نمی‌فهیدند. چنانچه دیگها می‌توانستند کار کنند بدین علت بود که بخاری که از آنها خارج می‌شد مقدار کافی از آب را با خود داشت تا جریانی از آب را باعث شود که آن را «تپنده و کم‌وبیش تأمین شده» توصیف می‌کردند. تردیدی نیست که برای کشتیهای رودخانه‌ای این کافی بود. این را هم بگوییم که آقای راون پسر، پس از سال ۱۸۷۵ به آزمایشهای خود به‌طور مفیدی ادامه داد و بدون آنکه بتواند این نوع دیگ را به‌طور قطعی بسازد محققاً در افتخار اشخاصی که پس از وی موفق شدند، بویژه ثورنیکرافت، سهیم است.

دوتامپل، پیروزی قطعی در ساخت دیگهای دارای جریان شتابنده: فلیکس دوتامپل یک افسر نیروی دریایی بود. هدف نخستین پژوهشهای وی حمل‌ونقل هوایی با وسایل سنگینتر از هوا بود. وی در این راه یک دیگ بخار لوله آبی هواپیمای خود طرح کرد، اما مخصوصاً همین دیگ بود که نام دوتامپل را ماندگار ساخت.

باید این نکته را تأکید کرد که اختراعی که در سال ۱۸۵۷ دوتامپل به ثبت رسانید شرح مفصل و دقیق نخستین هواپیمای فرانسه است. پس از آقای‌هنسن[1] که دوتامپل اطلاعی از کارهای وی نداشت، او قطعات اصلی هواپیما را، همان‌طورکه بعدها ساخته شد، دقیقاً شرح داده است. وی تصور می‌کرد که با داشتن ۱۷ متر گسترهٔ بالها و یک ملخ چهارمتری، یک موتور شش اسب بتواند سرعتی برابر ۹ متر در ثانیه به هواپیما بدهد، اما چگونگی آن هنوز مشخص نشده بود. او بدون اینکه به ساخت واقعی هواپیما دست یابد روی مدل مورد نظر خود مدت بیست سال به مطالعه و

1. Henson

آزمایش پرداخت. نتیجهٔ ملموس کوششهای وی به‌دست آوردن امتیاز دیگ بخار با جریان شتابنده در سال ۱۸۷۶ بود.

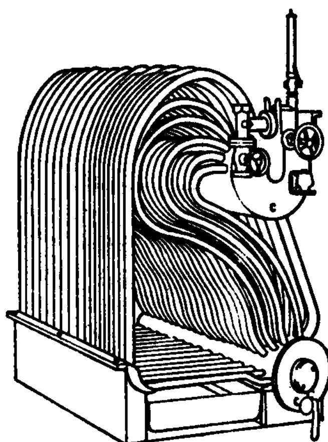
اصول ساخت چنین دیگی همان بود که در دیگ گورنه دیدیم. آب را در لوله‌های بلند و باریک که به مخازن بالا و پایین در خارج کوره راه داشتند بسرعت جریان می‌داد؛ لوله‌های برگشت آب، این دو مخزن را به یکدیگر مرتبط می‌ساختند. نویسنده صریحاً می‌نویسد: «دو لولهٔ بزرگ (برگشت) که مقطع هر دو بر روی هم، حداقل برابر مجموع مقطعها همهٔ لوله‌های باریک («تبخیرکننده») است.» اصول جریاندهی آب بروشنی معین شد. در همین زمان است که راون پسر، پس از تحمل شکست در *propontis* به همین نتایج می‌رسد.

دریاداری ملی فرانسه بی‌درنگ به این سیستم علاقه یافت و با دیگهایی، نخست کوچک و بعد بزرگ و بزرگتر، آزمایشها را شروع کرد. به‌آسانی مزیت چنین سیستمی آشکار شد: بالا رفتن سریع فشار، دوام زیاد لوله‌ها، جمع شدن رسوبات آهکی در مخزن پایین، ترکش بدون و خامت امکان ادامه داشتن کار دیگ پس از خرد کردن لوله‌های آسیب‌دیده. در آزمایش آبرسانی به دیگ خالی و سرخ شده در اثر حرارت، همین نتایج گرفته شد. این دیگ در سال ۱۸۸۲ شکل نهایی خود را با دو مخزن در زیر و یکی در بالا به‌دست آورد. در سال ۱۸۸۵ تجهیزات *Torpilleur 20* آغاز پیروزی قطعی دیگ بخار با جریان شتابندهٔ و آب را نمایش داد. موفقیت این مدل در ده سال بعد با پیدایش انواع بسیار مهم و بسیار رایجی از آن استحکام یافت.

دیگ ثورنیکرافت در ۱۸۸۵ به ثبت رسید. تنها تفاوت اصولی آن با دیگ بخار دوتامپل این بود که لوله‌ها در بالای سطح آب، در مخزن بالایی می‌ریختند (شکل ۶۸). باریک بودن قطر لوله‌ها، جریان تپنده را ممکن ساخت؛ بدین‌ترتیب که هر بار که مقداری کافی از بخار در لوله‌ها تشکیل می‌شد کمی آب با خود همراه داشت. این مکانیسم را می‌توان عقب مانده دانست اما در واقع جریان سریع آب را تأمین می‌کرد زیرا از پدید آمدن گرداب در مخزن بالایی جلو می‌گرفت. در ده سال ۱۸۸۵ ـ ۱۸۹۵ دیگ بخار ثورنیکرافت به‌طور سیتماتیک در اژدرافکنها جای دیگ بخار لوکوموتیو را که تا آن زمان به‌کار گرفته می‌شد، گرفت.

این نکته را تذکر دهیم که دیگ بخار یارو با لوله‌های مستقیم و بدون لوله‌های برگشت بود؛ اما چندین لایه لوله‌های تبخیرکننده و لوله‌های خارجی، که سردتر بودند، آب را برمی‌گردانیدند. در مورد دیگ نورمن باید گفت که حدود سال ۱۸۹۰ به‌کار افتاد و اقتباسی از دیگ دوتامپل است.

دیگ بخار با آب شتابنده یا با لوله‌های تبخیرکنندهٔ تقریباً عمودی نیز در نیمه نخست سدهٔ



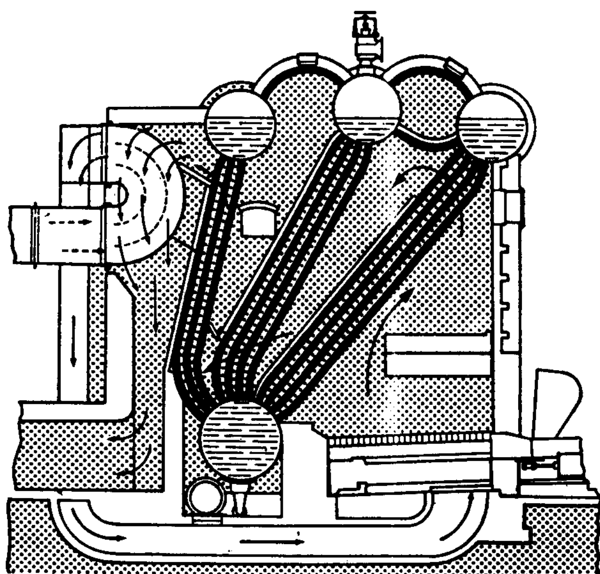
شکل ۶۸.دیگ ثورنیکرافت، مدلی که معمولاً در اواخر سدهٔ نوزدهم در اژدرافکنها نصب می‌شد.

بیستم در کاربردهای زمینی رواج یافت. انواعی از آن وجود دارند که با قطعات اصلی آنها، در دیگهایی که در بالا شرح آنها داده شد آشنا شده‌ایم. مثلاً مدل استرلینگ دارای سه ردیف لوله است که یک بدنهٔ زیر را به سر بدنهٔ بالایی متصل می‌سازند (شکل ۶۹). مدل سوسیته آلزاسین دارای این برتری است که یک ردیف لوله، دو بدنه را به‌هم مربوط می‌سازد و غیره. جزئیات این مکانیسمها، اهمیت چندانی ندارند (گذرگازهای سوختی در آنها بهتر شده‌است) زیرا اصول کار آنها تغییری نکرده است.

دیگهای بزرگ جدید: در پایان این سخن، ما مجموعهٔ تحول دیگهای نیروگاههای حرارتی را در نیمهٔ نخست سدهٔ بیستم بتندی مرور می‌کنیم. انتخاب نیروگاههای حرارتی بدین دلیل است که در این مراکز با دیگهای مهم و نوین روبه‌رو هستیم.

به‌طورکلی این تحول بر پایهٔ کاهش بهای انرژی پیش رفته است. حدود سال ۱۹۵۰ بهای هر کیلو وات در ساعت (مصرف خانگی) یک‌چهارم بهای آن در پیش از سال ۱۹۱۴ بود (ضریب افزایش ۴۲ می‌باشد، درحالی‌که ضریب کلی افزایش وسایل زندگی در حدود ۱۷۰ بود). در رشتهٔ مورد بحث ما، پیشرفت در افزایش ابعاد و دما و نیز بازده انجام گرفت. حدود سال ۱۹۰۰ دیگ بخاری با تولید شش تا هشت تن بخار در ساعت، ابعاد غول‌آسا داشت. حدود سال ۱۹۵۰ در شهر ژنویلیه دیگی کار می‌کرد که ۲۴۰ تن بخار در ساعت تولید می‌کرد و در مثلاً شهر ویتری‌سود[1] دیگی

1. Vitry-sud



شکل ۶۹.دیگ استرلینگ، حدود ۱۹۲۵.
سه ردیف لوله‌های تبخیر. پیچ و خمها گاز کوره را ناچار از مسیری زیگزاگ عبور می‌دهند.این مدل شامل دمی است که کشش هوا را تسریع می‌کند، یک دستگاه گرم‌کنندهٔ هوا و یک کوره اتوماتیک است.

۴۵۰ تن بخار تولید می‌کرد. پانزده سال پس از این مدت به دیگ ۷۶۵ تنی در شهر پون سورسامبر[1] بر می‌خوریم و حتی ۱۸۱۵ تنی در پورش‌ویلB [2]. حدود سال ۱۹۰۰ فشارکاری دیگ از ۱۲ به ۱۵ کیلوگرم رسید و دمای بخار از ۲۵۰ به ۳۰۰ درجهٔ صد بخشی. پنجاه یا شصت سال پس از آن، فشارهای ۱۲۰، ۱۵۰ و حتی ۱۷۵ کیلوگرم و دماهای ۵۰۰ و ۵۲۵ درجه صد بخشی، شدیم رایجی بود. طی نیم سده بازده دیگ از ۷۵ به ۹۰٪ رسید.

بهتر شدن چرخهٔ کار با توربینها، این مشتری یگانهٔ دیگهای کنونی دو کار جدید را موجب شد: داغ کردن دوبارهٔ بخار طی دتانت؛ گرم کردن مقدماتی آبی که وارد دیگ بخار می‌شود در مرحلهٔ بین کندانسور و دیگ، بوسیلهٔ بخاری که در جریان دتانت گرفته شده است، در طبقات کم فشار توربین. این عملیات، تغییراتی را در ساختمان دیگ بخار پدید آورد. تعداد ردیف لوله‌های تبخیرکننده به‌مقدار زیادی کم شد زیرا تبخیر در دمای بالا انجام می‌گیرد. وانگهی آب گرم شده

1. Pont-sur-sambre 2. Porcheville B

وارد دستگاه پیشگرم‌کن می‌شود؛ در نتیجه، این دستگاه در دمای بالا کار می‌کند. بدین‌ترتیب، این دستگاه نمی‌تواند گازهای سوخته را تا دمای دودکش سرد کند. این نقش، قطعه جدیدی را طلب می‌کرد و آن، گرم‌کننده هوا بود. اما کوره‌ای که با هوای گرم تغذیه می‌شود در دمای بالا کار می‌کند. بنابراین آن را با به‌اصطلاح پوشش آبی احاطه می‌کنند و آن لوله‌هایی است که در تبخیر آب سهیم می‌شوند.

با کار سیستماتیک تحقیقی برای کاهش اتلاف، بازده دیگ را می‌توان بالا برد. این اتلاف در سه بخش صورت می‌گیرد: از راه تشعشع، از راه نیم‌سوز شدن و بالاخره بویژه اتلاف دما از راه دودکش. برای کم کردن این اتلاف سوم است که گرم‌کنندهٔ مکانیکی را مورد استفاده قرار می‌دهند. همه هوای اضافی مقدار هنگفتی گرما به‌همراه خود بیرون می‌برد. این امر در گذشته زمانی اتفاق می‌افتاد که قشر مواد سوختی هموار نبود، بویژه زمانی‌که دریچه‌ها برابر نیستند. این حالت پیدایش انواع کوره‌های خودکار را ناگزیر ساخت: پنجره‌های مکانیکی؛ پنجره‌های مدرج (کوره‌های دارای سوخت‌پاش)، کوره‌هایی که هنوز خرده زغال می‌سوزانند. در امریکا، حدود سالهای ۱۹۲۰ کوره‌هایی که با خاکه زغال گرم می‌شدند ساخته شدند (کورهٔ کرامر[1]، کورهٔ سایکلون[2])، که کوره‌های با سوخت مایع یا گازی بدون هیچ اشکالی جانشین آنها شدند. در اینجا این نکته را هم بگوییم که کاربرد روکش فلزی و آب‌بندی شده بدلیل نفوذپذیری دیوارهای آجری کوره مفید بود؛ ورود هوای بیرون به‌علت تورفتگی کمی که بر آن حکومت می‌کرد به‌آسانی به ۱۰٪ می‌رسید. پیشرفت وسایل فرمان سوخت: کنتور بخار، کنتور هوا، دماسنج دمای گازهای خروجی، دستگاه آنالیزکننده‌ای که مقدار $CO_۲$ گازهای خروجی را برای اطلاع از زیاد بودن هوا تعیین می‌کند، توانستند در سال ۱۹۵۰ خودکار بودن امر سوخت را با کمک انواع سرووموتورها تأمین کنند.

حال ببینیم که دیگ بخار از نظر شکل و ساخت چه تحولاتی را پشت‌سر گذاشته است؟ کوره، که درگذشته شمه‌ای دربارهٔ آن گفته‌ایم مربوط به دیگ بخار دارای تشعشع زیاد است، یعنی تقریباً همه سطح تشعشع در معرض شعله می‌باشد و با تشعشع گرما کار می‌کند. در مقابل، سطوحی که با روش همرفت (کنوکسیون) گرما عمل می‌کنند اهمیتشان کم شده است و این حالت نقطهٔ مقابل دیگهای قدیم است. از این پس ۸۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم آب در ساعت، در هر مترمربع، به‌جای ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم سابق تبخیر می‌شود. این موفقیت هم مرهون کار بوسیلهٔ تشعشع است، اما باید جریان آب سریع باشد. با آزمایشهایی که آقای یارو ـ که دیگ مورد استفاده وی در بالا شرح داده شده است انجام داد، گرایشی به حذف برگشت آب پدید آمد؛ بازگشت آب با لوله‌های دارای گرمای

1. Kraemer 2. Cyclone

کمتری انجام می‌شود. این کار چندین حادثه را در ردیف لوله‌های بینابینی به‌علت نامعلومی، سبب شد. رفع این عیب در جداسازی ردیف لوله‌های بالارونده از لوله‌های پایین‌رونده، مثلاً با گذاردن دستگاه داغ‌کننده، میان آنها بود.

ردیف لوله‌های داغ‌کننده نیز باید از فولادهای آلیاژی مقاوم در ۴۰۰ درجه ساخته شده باشند. در توربینها میل به داغ کردن زیاد بخار وجود دارد زیرا این کار مانع پیدایش قطرات آب در پایان دتانت است؛ قطرات آب به پرگان توربین آسیب می‌رسانند. ما دیدیم که دستگاه پیشگرم‌کن را به‌علت دمایی که در آن کار می‌کرد کاملاً تغییر دادند. کار تبخیر می‌تواند در آنجا انجام گیرد. در واقع این دستگاه به ضمیمه‌ای از ردیفها لوله‌ها تبدیل شد. در مورد دستگاه گرم‌کنندهٔ مجدد هوا، دیدیم که نقش دستگاه قدیم پیشگرم‌کن از این پس به گرم‌کنندهٔ هوا محول شد. این قطعهٔ بسیار مهمی است؛ سطح آن غالباً بزرگتر از سطح دیگ است، اما از آنجا که بدون فشار کار می‌کند می‌تواند ساختمان سبک و ارزان داشته باشد.

باز هم می‌توان از تعداد زیادی وسایل جالب، از نظر تمیزکردن قطعات مختلف، یا غبارگیرهای الکتروستاتیکی، مثلاً دود سخن راند. پیش از هرچیز، پیدایش نوع تازه‌ای دیگ را تذکر دهیم که تکامل واقعی آنها احتمالاً به آینده تعلق دارد. در این نوع دیگ، تلمبه، آب گرم مخزن بالایی را با فشار در لوله‌ها می‌راند. از این نوع دیگ می‌توان انتظار زیاد شدن وزن بخار تولید شده در هر ساعت در هر مترمربع را داشت. وانگهی، جنبه‌ای که انقلابیتر است، دیگهایی با سوخت تحت فشار وجود دارند. تکنیک این نوع دیگ، نتیجهٔ تحقیقات روی توربینهای گازی و توربو رآکتورهاست. با این دیگها اندازه‌ها بسیار کوچک می‌شوند وانگهی سرعت شارهٔ گازی نیز از عوامل بهتر شده تبادل گرما می‌باشد (دیگ Velox).

کندانسورها

مسألهٔ میعان را چگونه باید حل کرد؟ باید نخست به داده‌های فیزیکی توجه کرد که با گذشت زمان هیچ تغییری نیافته‌اند. کندانسور همیشه بخارکم فشار دریافت می‌کند، خواه از مرحلهٔ دتانت گذشته باشد، خواه نگذشته باشد. باید گفت که هر کیلوگرم بخار حدود ۶۰۰ کالری وارد این دستگاه می‌کند. با دانستن دمای آب خنک‌شوندهٔ موجود و دمایی که می‌خواهیم کندانسور داشته باشد محاسبهٔ وزن آب به‌کار رفته برای مایع کردن وزن معینی از بخار، کاری بسیار آسان است. در عمل، دمای کندانسور ۴۰ و دمای آب سرد ۱۵ درجه است. بدین‌ترتیب، می‌بایست ۲۲ کیلوگرم آب برای هر کیلوگرم بخار

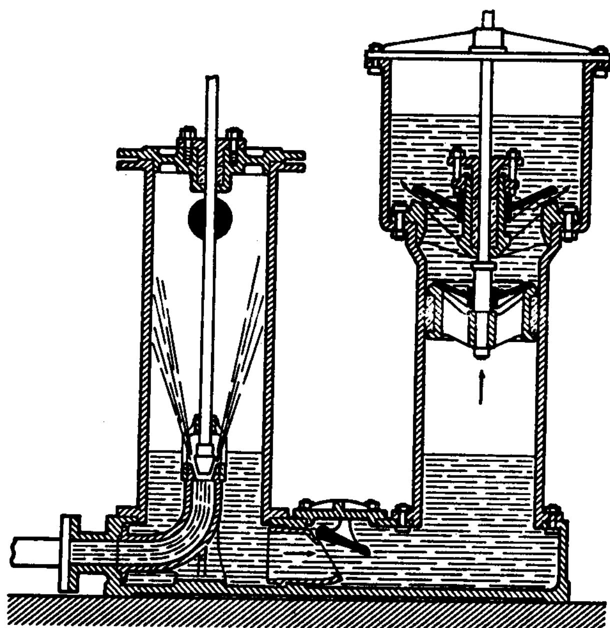
وجود داشته باشد. این اندازهٔ تقریبی در قدیمترین نوشته‌های مربوط به این رشته ضبط شده‌اند.

هوای حل شده در آب ۱۵ درجه و فشار یک جو، در حدود ۵٪ حجم این آب است. در کندانسور به‌علت بالا بودن دما و پایین بودن فشار، آزاد شدن نسبی بخار پدید می‌آید. بدین‌ترتیب، مخلوط آب‌وهوا را می‌توان برابر ۱٫۳۰ لیتر در کیلوگرم بخاری که از کندانسور خارج می‌شود ارزیابی کرد. از همین روی تلمبه‌ای که این وظیفه را به انجام می‌رساند از همان زمان وات نام تلمبهٔ هوا داشته است.

برای میعان دو روش وجود دارد. از نظر تاریخی این دو روش به توالی یکدیگر آمده‌اند. کندانسورهای قدیمی از نوع تزریقی یا آمیزه‌ای بودند. بدین‌ترتیب که آب سرد در ظرفی تزریق می‌شود که بخار با خارج شدن از سیلندر در آن وارد می‌شود. این نوع کندانسور، بتنهایی حدود یک سدهٔ تمام در زمین و کشتی به‌کار گرفته می‌شد.

روش دوم، مایع شدن بخار بر اثر تماس با یک جدار سرد است که روی دیگر آن با آب سرد خنک می‌شود. این روش به میعان سطحی شهرت دارد. این نوع وسیله، کار کردن دیگ بخار در یک مدار بسته را ممکن می‌سازد. شاید بدین علت باشد که این روش نخست در کشتیها عملی شد تا اینکه آب مشروب به دیگ داده شود. برای این روش یک دورهٔ آزمایش در ۱۸۴۰ ـ ۱۸۶۰ و یک دورهٔ رواج در ۱۸۶۰ تا ۱۸۸۰ را می‌توان تشخیص داد. پس از این تاریخ به‌علت تغییر شکل ماشینهای کشتی، اندیشهٔ به‌کار بردن وسیلهٔ دیگری در دریا محال شد. بعدها در اواخر سدهٔ نوزدهم، در روش میعان سطحی، به‌دنبال پیدایش توربین که کندانسور از آن تجزیه‌ناپذیر است تحول تازه‌ای ایجاد شد، و بدون اینکه تغییر شکل اساسی یابد، در اوایل سدهٔ جاری به دستگاههای بسیار قدرتمندی تبدیل شد.

کندانسور تزریقی: چون ماشین نیوکامن دارای مرحلهٔ تزریق آب سرد در استوانهٔ خود بود می‌توان گفت که این ماشین با میعان تزریقی کار می‌کرد. در این دوره هنوز مفهوم مقدار گرما وجود نداشت و معلوم است که از مفهوم گرمای ویژه و گرمای نهان هیچ نمی‌دانستند. بخوبی آشکار است که آنها می‌بایست به تنظیم مقدار تزریق به‌طوری‌که ماشین بنحو قابل قبولی کار کند، بسنده کنند. با این‌حال، آقای اسمیتون که می‌فهمید که می‌توان امیدوار بود که استوانه را فقط به‌اندازه‌ای سرد کرد که برای رسیدن به درجه لازمی از خلأ کافی باشد کوشید عمل را مستدل سازد. نمی‌توان محاسبات وی را دنبال کرد. او فقط توانست قاعدهٔ زیر را پیشنهاد کند: دمای میعان دارای بهترین بازده، نسبت معکوس با ریشهٔ پنجم قطر استوانه دارد. ما متقاعد شده‌ایم که استدلال نظری آقای اسمیتون برای



شکل ۷۰.کندانسور تزریقی، شبیه کندانسوری که وات به‌کار برد.
چپ: خود کندانسور؛ راست: تلمبهٔ هوا. شیرهای تلمبهٔ هوا دوگانه می‌باشند تا مکیدن همزمان هوا و آب ممکن باشد.

توجیه این قاعده، آشکارا بر پایهٔ اطلاعات به‌دست آمده از عمل بوده است.

نخستین کندانسورهای تزریقی، به ماشینهای وات تعلق داشتند که دارای فشار کم و شاهنگ (بازوی نوساندار) بوده است. تا زمانی‌که ماشینهای شاهنگی ساخته می‌شد دستگاه همان شکلی را که مخترع آن، پس از پایان آزمایشها، پیشنهاد کرده بود حفظ می‌کرد: استوانه‌ای به‌طور عمودی در ظرفی از آب سرد گذاشته می‌شود و در نتیجه زیر سیلندر موتور قرار می‌گیرد. با عمل ساده مکش، تزریق انجام می‌گیرد. خود کندانسور به تلمبهٔ هوای خود تکیه دارد. درحالی‌که هم از نظر شکل و هم از لحاظ گنجایش، تقریباً با آن یکی است و از راه یک لنگ عمودی، که پیستون آن را به شاهنگ ماشین متصل می‌سازد حرکت به آن انتقال می‌یابد (شکل ۷۰).

وات در کار خود به قطر هر یک از این دو ظرف، دوسوم قطر پیستون موتور را می‌داد. این

مطلب نشانهٔ آن است که تلمبهٔ هوا بسیار بزرگتر از اندازهٔ حداقلی است که از راه نظری به‌دست می‌آید. در چنین حالتی، کار جذب شده، بسیار زیاد است (برحسب زمانها و سیستمهای مختلف از ۲/۲ تا ۴/۴٪ پیش می‌رود)، اما چون مقدار خلأ درکندانسور بیشتر و نیز به‌علت اینکه راه‌اندازی آن ساده‌تر است. مقداری صرفه‌جویی در کار ایجاد می‌شود.

در مورد ظرفیت کندانسور، باید گفت که هیچ‌گاه قاعده روشنی برای تعیین آن نبوده است. مسألهٔ بسیار مهم این است که میعان به‌محض باز شدن دریچهٔ فرار، صورت گیرد تا در آغاز رفت پیستون، فشار متقابلی ایجاد نشود. این منظور به زیاد کردن گنجایش می‌انجامد. اما این محدودهٔ بسیار تنگ را بدون برخورد با دشواریهای برخاسته از حفظ خلأ و بویژهٔ مشکلات سنگین مربوط به تخلیه در لحظهٔ شروع کار نمی‌توان درهم شکست. بنابراین ساختمان کندانسور در مجموع تقریباً همیشه به آنچه که وات در ابتدا پذیرفته بود وفادار ماند.

در این نوع کندانسور، تلمبهٔ هوا از نوع یکطرفه و دارای سه دریچه بود که یکی در مقابل پیستون، دیگری روی آن و سومی در پشت آن قرار داشت. در واقع نباید فراموش کرد که مسأله تلمبه کردن همزمان آب‌وهوا با فشاری کمتر از جو در میان بود. در این نوع تلمبهٔ مورد بحث ما، با پایین آمدن پیستون، هوای زیر آن فشرده و هوای روی آن رقیق می‌شود به‌طوری‌که بلند شدن دریچهٔ روی آن آسان می‌گردد.

برای بررسی تفصیلی تحولات کندانسور وابسته به ماشینهای ثابت فرصتی نیست. هیچ تغییر اساسی در آن پدید نیامد؛ دستکاریهایی که در آن شد مربوط به فعال کردن آسان تلمبهٔ هوا بود. در ماشینهای افقی، تلمبهٔ هوا را معمولاً در دنبال یک استوانه می‌گذاشتند و در آن صورت کندانسور شکل یک جعبهٔ چدنی را داشت که در جای خالی فونداسیون ماشین گذاشته می‌شد.

چند کلمه‌ای هم باید دربارهٔ کیفیت خلأ و وسایل اندازه‌گیری متصل به کندانسور بگوییم. موقعی خلأ کم گفته می‌شود که فشار برابر ۰/۲ کیلوگرم بر سانتیمترمربع باشد؛ خلأ خوب، فشاری برابر ۰/۱ کیلوگرم و خلأ بسیار خوب ۰/۰۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع است. همان‌طورکه در آینده باز خواهیم گفت، برای ماشینهای پیستونی، تنها خلأ خوب کافی است.

وسیلهٔ معمول اندازه‌گیری که روی کندانسورها گذاشته می‌شد، نشانگر خلأ نام داشت. این وسیله تفاوت فشار اتمسفر و فشار مسلط بر کندانسور را برحسب میلیمتر جیوه نشان می‌داد، کاری که نیاز به تصحیح برحسب فشار هوا داشت. از سوی دیگر، دماسنجی دما را اندازه می‌گرفت و بدین‌ترتیب می‌توانستند فشار بخار را به‌دست آورند. تفاوتی که غالباً بین دو مشاهده وجود داشت، دلیل بر

این بود که در اثر وجود هوا در کندانسور، فشار تا چه اندازه زیاد شده است. فشارسنج جیوه‌ای و دماسنج در اواخر سدهٔ هجدهم به شکلی در روی کندانسور به‌کار برده می‌شدند.

کندانسورهای سطحی: میعان در سطح از جمله روشهایی است که ریشهٔ نامعلوم دارد، آقای سیوری از این روش برای خنکسازی یک جریان آب در بیرون ظروف بخار استفاده کرده است. همچنین آقای نیوکامن در مرحلهٔ تحقیقات خود، این جریان آب روی استوانه را به‌کار گرفته است. اما در عمل، کاربرد آن با فشار زیاد، در کشتیها حدود سال ۱۸۸۰ صورت گرفت، در این کندانسورهای سطحی از آب شیرین برای آبرسانی به دیگها و از آب شور برای خنک کردن استفاده می‌شد. در گذشته تاریخ ماشینهای دو یا سه انبساطی بررسی شد و نیازی به بازگشت به آنها نیست؛ تنها باید این نکته را افزود که کاربرد آنها بدون کندانسورهای سطحی، ممکن نبود.

بدون چنین وسیله‌ای، اهمیت کارایی، که در باز نمودن آن تا این اندازه کوشیدیم قابل درک نیست. ما دیدیم که موتورهای با صرفه با بالا بردن نسبت وزن مفید از ۲۰٪ به ۳۰٪ دارای کارایی ۵۰٪ خواهند بود. به‌عبارت دیگر، چنان‌که بخواهند قدرت بالا رود با صرفه‌جویی ۲۰٪ از وزن زغال مصرفی، حدود ۱٫۸ کارایی خواهد بود. این پیشرفت مدیون ماشینهای دارای انبساط چندگانه است، اما این نوع ماشینها بدون داشتن دیگهای پرفشار میسر نیستند. دیگهای پرفشار آب شور را نمی‌پذیرند و بنابراین در تحلیل آخر، ماشینهای دارای انبساط چندگانه در کشتی نمی‌توانند بدون کندانسور سطحی باشند.

در فشار کم، کار با آب دریا، اگر استخراجها بخوبی تنظیم شده باشند کاملاً کافی است. ما در مورد دیگهای بخار دیدیم که اتلاف گرمایی ناشی از استخراجها، حداکثر ۵٫۵٪ است که بخشی از آن را می‌توان با دستگاه دوباره گرمکن جبران کرد. با فشار کم، کندانسور سطحی همیشه کار پر زحمتی بوده است، زیرا چون این نوع ماشینها وزن زیادی بخار بیرون می‌دهند، جای زیادی می‌گیرند. دست‌وپاگیری این ماشینها و وزن بخار زیاد سبب می‌شوند که بهای بخار تولیدی گزاف باشد. با به‌کارگرفتن فشار بالا اوضاع بکلی تغییر می‌کند. استفاده از آب دریا هم به علت شوری آن و هم به‌مناسبت داشتن سولفات کلسیم ـ که در دمای ۱۴۰ درجه رسوب می‌کند و تشکیل لایه‌هایی می‌دهد که مانع استخراج هستند ـ ممکن نیست. وانگهی وزن بخار مصرفی با ۵۰٪ کاهش سبب می‌شود که ابعاد کندانسور به همین نسبت کوچک شوند.

این نکته را هم می‌توان افزود که در اواسط سدهٔ نوزدهم از شست‌وشوی مواد چربی که دهانهٔ لوله‌های باریک را ـ که لازمهٔ هر کندانسور سطحی هستند ـ می‌بستند با سود محرق آگاه نبودند.

وانگهی صنعت لاستیک آن‌قدرها پیش نرفته بود که بتواند مادهٔ مناسبی برای آب‌بندی خوب درزها تأمین کند؛ این مواد بعدها شناخته شدند.

همهٔ این دلایل گواهی می‌دهند که دوران بررسیها و آزمایشها در این قسمت بسیار طولانی بوده است. در مطالب بعدی ما فقط به کارهای انجام یافته می‌پردازیم و به طرحها کاری نداریم.

گفته شده است که وات زمانی یک کندانسور سطحی با لوله‌های قلعی را مورد آزمایش قرار داد اما نتایج بد این آزمایش که خلأکم وکبره بستن لوله‌ها بود سبب شد که بی‌درنگ از آن صرفنظر کند.

آقای کارترایت حدود سال ۱۷۹۷ در ماشین بخار الکلی خود منظماً از کندانسور سطحی استفاده می‌کرد. و این نخستین کاربرد مستمر این وسیله، گرچه روی ماشین غیرآبی است. در واقع از نتایجی که کارترایت از کاربرد آن گرفت اطلاع کمی در دست است.

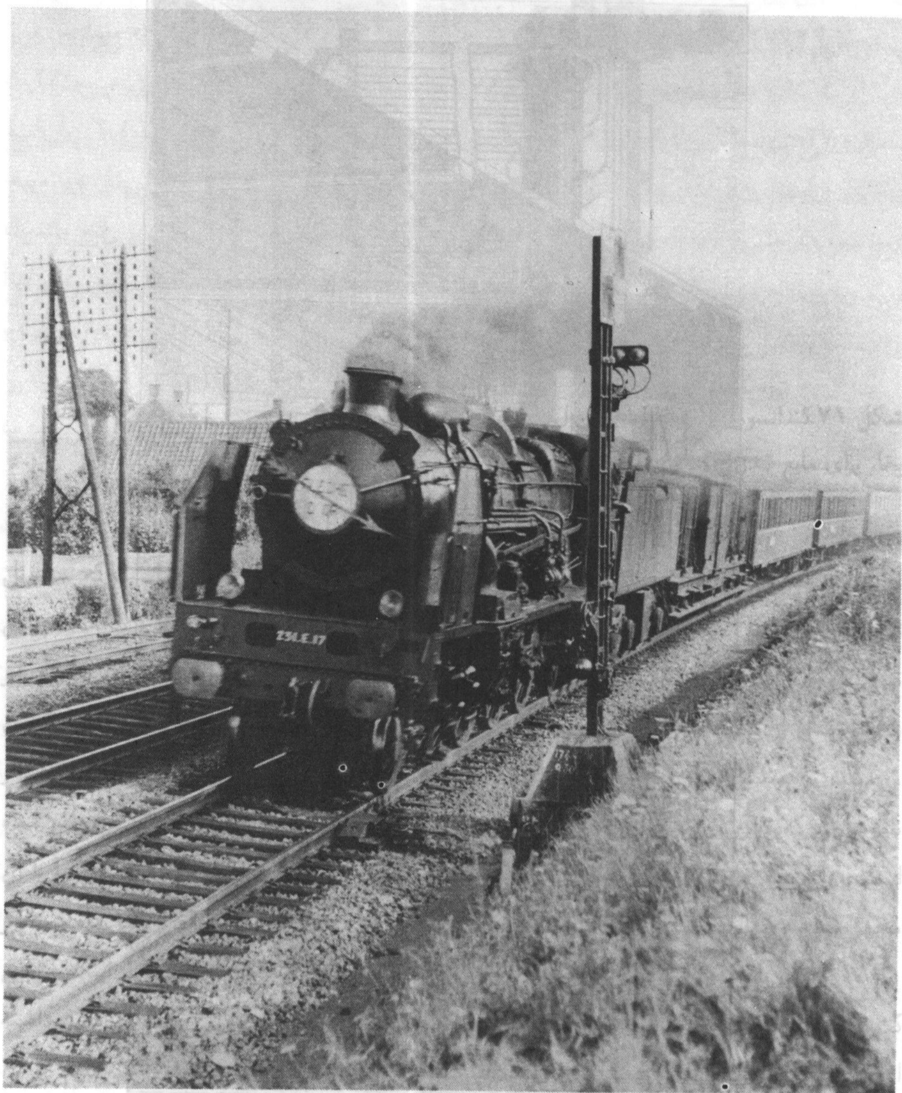
پس از کارترایت باید تا سال ۱۸۲۲ پیش رفت تا با کشتی *Post Boy* برخورد کنیم که در رودخانه کلاید آمدورفت داشت. این ماشین ۳۰ اسبی ساخت آقای جان نپر بود. این کندانسور از نوع لوله‌های بخار، به طول ۳٫۶۰ متر و قطر ۱۵ میلیمتر بود. گویا چند سال کار کرده است.

حدود سال ۱۸۲۹ ما با کارهای آقایان بریث‌ویت[1] و اریکسن آشنا می‌شویم که ازکندانسورهای دارای بیست مترمربع سطح متشکل از لوله‌های بخار ۴۴ میلیمتری استفاده می‌کردند. می‌توان از کشتی *Louis* نام برد که در سرن در کارخانهٔ جان کاکریل ساخته شد وکمی بعد یک کندانسور معمولی روی آن گذاشته شد. از آن بدشانسترکشتی *Victory* بود که جان راس[2] سفر قطبی خود را در سالهای ۱۸۲۹ ـ ۱۸۳۳ با آن انجام داد. این سفر در ماه مه ۱۸۲۹ آغاز شد، کندانسور سطحی کمی پس از این تاریخ کنار گذاشته شد و در ماه اکتبر همان سال همهٔ قسمت موتور را برداشتند و مجموع هیأت، مسیر خود را با بادبان ادامه داد! به یاد آوریم که در جریان همین سفر بود که محل دقیق قطب مغناطیسی شمال برای نخستین بار معین شد.

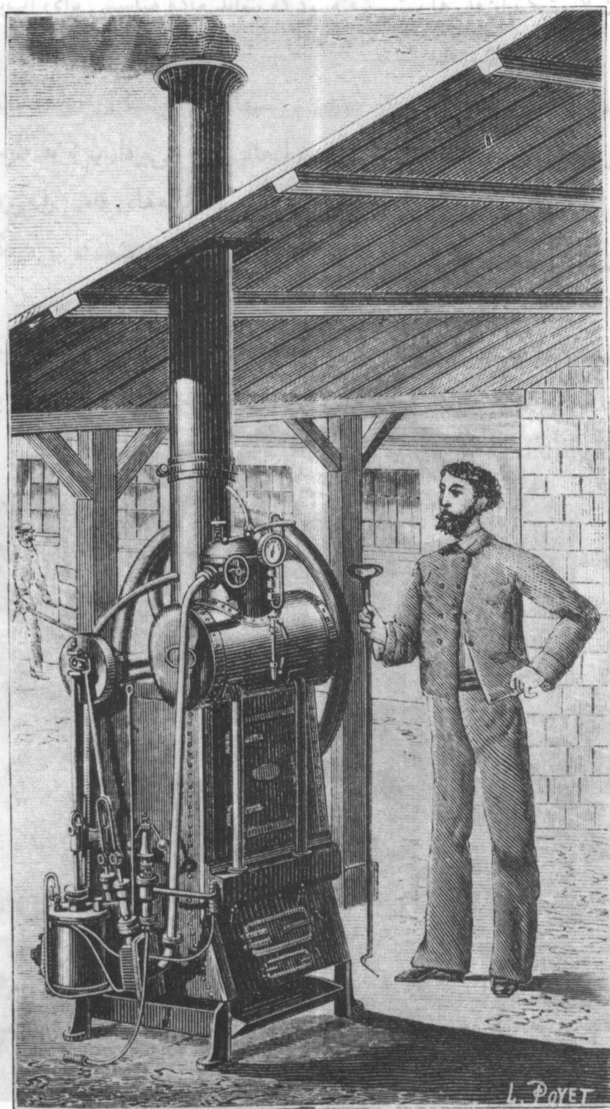
طی سال ۱۸۳۰ دوکشتی بخاری گارون با نامهای: اومنیبوس و اندوستری مدتی با کندانسور لوله بخار کار می‌کردند. این دستگاهها ساخت آقای باسک کین[3] بودند.

نکتهٔ دیگری را هم باید یادآور شد و آن آزمایشهایی است که در سالهای ۱۸۲۵ تا ۱۸۴۱ به توسط آقایان هوارد و سایمینگتون روی کندانسورهای تک‌آبه انجام گرفتند. در این نوع کندانسورها، که رواج نیافتند، کندانسور از نوع افشانکی بود با این تفاوت که همیشه با یک آب کار می‌کرد. آب در یک تبادل‌کنندهٔ حرارتی، که در سطح بود، خنک می‌شد.

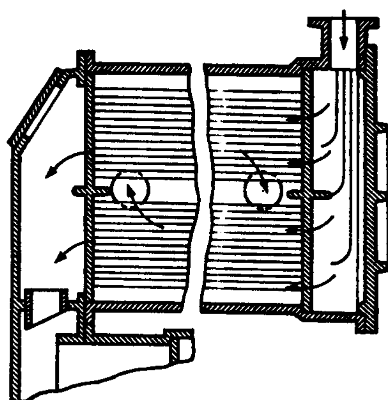
1. Braithwaite 2. Ross 3. Busk-Keene



تابلوی ۵. لوکوموتیو Fléche DÓR خط پاریس ـ کاله، حدود ۱۹۳۵.



تابلوی ۶. دیگ بخار لوله آبی فلیکس دوتامپل، حدود ۱۸۷۷.



شکل ۷۱.کندانسور سطحی، ساخته هال، ۱۸۳۷.
بخار برای مایع شدن وارد لوله‌هایی می‌شود که در آب سرد شناور هستند.

اینک به مهمترین قسمت بحث خود وارد شویم که سرگذشت آزمایشهایی است که سمیوئل هال در انگلستان انجام داده است. وی پس از اینکه امتیازی را در مورد نه‌تنها طرح بلکه همچنین نسبتها و طرز ساخت، به‌دست آورد توانست سیستم خود را با اطمینان فراوان در مدتی تقریباً برابر هشت سال از ۱۸۳۸ تا ۱۸۴۶ روی چند کشتی بخاری آزمایش کند (شکل ۷۱). آقای تامس تریدگلد، نویسندهٔ نامدار انگلیسی در تحریر. سال ۱۸۳۹ خود دربارهٔ ماشینهای بخار از ۱۱ ناو نام می‌برد که قدرت ماشینهای آنان تا ۳۰۰ اسب پیش می‌رفت. در این‌باره چیزی فراموش شده است و آن یک ماشین بخار ۵۰۰ اسبی است که کشتی پرزیدنت ۲۰۲۸ تنی اقیانوس‌پیما با آن مجهز شده بود. این کشتی در زمان خود زیباترین و بزرگترین بود. غرق کامل آن در ماه دسامبر ۱۸۴۱ در دریا یک تراژدی بود و آثار ناگواری در کندانسورهای سطحی داشت. با اینکه از این کشتی هرگز خبری به‌دست نیامد نمی‌توان تصور کرد که کندانسور در این غرق شدن تأثیر داشته است. باز یک ماشین ۷۰۰ اسبی متعلق به کشتی نوع فرقت *Penelope* را مثال می‌زنیم.

طرحهای مورد قبول آقای هال چگونه بوده‌اند؟ وی میعان ۲۵ کیلوگرم بخار در ساعت برای هر مترمربع را می‌پذیرفت. این شرط، در محاسبه، مربوط به ماشین کم‌فشار ۰٫۸ تا ۰٫۹ مترمربع سطح میعان برای هر اسب است. تلمبهٔ آب سرد لازم برای تأمین این جریان آب باید بتواند ۲۷۲۰ لیتر آب را در هر ساعت برای مایع کردن ۴۵٫۶ مترمربع بخار، در همان مدت یا ۱۳۵۰ لیتر آب در ساعت برای هر اسب را جابه‌جا کند. این ارقام همانهایی هستند که در شرح مختصات امتیاز

به ثبت رسیده آمده‌اند. به‌عنوان نمونهٔ ساخت، می‌توان کندانسورهای کشتی ویلبرفورس را که آقای تریدگلد شرح داده است بررسی کرد. دو کندانسور در کشتی بود که هرکدام دارای ۲۳۷۴ لولهٔ مسی ۱۲٫۵ میلیمتری به طول ۲٫۲۴ متر داشتند. این ماشین ۵۶۷ اسب محاسبه شده قدرت داشت فشار آن ۱٫۳ کیلوگرم بود و در هر دقیقه ۲۱ دور می‌گردید. مقدار خلأ در کندانسور ۷۴۰ میلیمتر جیوه بود یعنی فشار درون آن، حدود ۲۰ میلیمتر جیوه بود. مکانیسمی که هال همواره در نظر داشت، مثل نمونهٔ پیش و برخلاف وضع رایج کنونی، شامل لوله‌های بخاری می‌شد که آب سرد آنها را در میان می‌گرفت. این ماشین‌ساز از نظر قانونی سرپوشهای جداشونده‌ای را پیش‌بینی کرده بود تا بتواند به لوله‌ها برای تمیز کردن آنها دست یابد.

همان‌گونه که دیده‌ایم این نوع کاربرد در حدود سال ۱۸۴۷ کنار گذاشته شد. فرقت ۷۰۰ اسبی در سال ۱۸۵۲، بدون اینکه یکبار هم سفر واقعاً جدی داشته باشد درهم شکست.

در فرانسه در همان دوران، اشخاص مختلف بویژه آقای پکور، فقط یک منظور را تعقیب می‌کردند و به راههای گوناگون نمی‌رفتند. برای اینکه با کارهای پیرسن[1] که در سال ۱۸۵۲ آغاز شده‌اند آشنا شویم باید به ممالک متحدهٔ امریکا مراجعه کرد. او سیستم خاصی مشهور به کندانسور دو خلائی داشت. یکی کندانسور سطحی بود که همیشه با بخار درون لوله‌ها سروکار داشت، اما تنها یک تلمبه هم تخلیهٔ آب مایع شده و هم جریان آب سرد را تأمین می‌کرد. شکی نیست (از جزئیات کار خبری نداریم) که این کار در پرتو کار مستقل هر دو رویهٔ پیستون بوده است. مقدار فشار در هر دو ظرف، تقریباً برابر بود بنابراین، درزهای لوله‌ها فشار بسیار کمی متحمل می‌شدند و این امتیاز این مکانیسم بود. رواج این سیستم در ممالک متحده بسیار زیاد بود: نخست در کشتی *Alleghany* در ۱۸۵۲، سپس در دیگر کشتیهای اقیانوس‌پیمای نظیر *Adriatic* از کالینز با ماشینی که قدرتش به ۳۰۰۰ اسب می‌رسید. این همان سیستمی بود که در سال ۱۸۵۸ در ناوشکن فرانسه به نام *Mouette* کار گذاشته شد.

در واقع در همین سالها بود که فرانسه به این مسأله علاقه‌مند شد. در زمان جنگ کریمه تعدادی ناو که آب‌نشین آنها کم بود با ماشینهای پرفشار بدون کندانسور مجهز شده بودند. بعدها آنها بناچار برای جبران آب از کندانسورهای سطحی استفاده کردند.

کمی پیش از این تاریخ بود که دوترمبله[2] ماشینهای بخار مرکب را پیشنهاد کرد هر یک باید دو کندانسور سطحی داشته باشد. این قضیه که به سالهای ۱۸۵۲ ـ ۱۸۵۵ مربوط می‌شود از چند جهت مورد توجه قرار گرفت و در بسیاری از شوخیهای مربوط به یک «اختراع» عجیب و

1. Pirrson 2. Du Tremblay

غریب و کم‌وبیش معاصر ژول‌ورن وارد شد. باید توجه داشت که ماشین‌سازان آن زمان از اطلاعات پایه‌ای ترمودینامیک، که بتازگی انتشار یافته بودند بکلی بی‌خبر بودند. وانگهی در همین زمان بود که دریاداری فرانسه فرصت یافت تا تجربیات عملی با کندانسورهای سطحی کسب کند.

ماشین بخار مرکب: ۱) یک ماشین معمولی با فشار ۲/۵ تا ۳ اتمسفر است. این ماشین در یک تبادلگر حرارتی سطحی که اتر تبخیر می‌کند در ۶۰ درجه و ۰/۵۳ کیلوگرم فشار آب را بیرون می‌دهد. فشار بخار اتر در این دما به دو اتمسفر می‌رسد. آنچه را که امتیاز این ماشین گمان می‌کردند، چنین است. ۲) این بخار اتر، در یک ماشین پیستوندار، که روی همان محور ماشین قبلی قرار دارد کار می‌کند و اتر در تبادلگر سطحی دومی که با آب دریا یا رودخانه خنک می‌شود با فشار ۰/۲۸ کیلوگرم مایع می‌گردد. بدین‌ترتیب، دیده می‌شود که دو کندانسور سطحی آبشار مانند وجود دارد که یکی بخار آب را مایع می‌کند و با اتر خنک می‌شود و دیگری بخار اتر را مایع می‌کند و با آب خنک می‌شود.

در سال ۱۸۵۲ نخستین آزمایشها در این مورد در مارسی برگذار شد و پس از آن ماشین بخار مرکب را روی تعدادی از کشتیهای بخاری شرکت آرنو ـ تواش[1] و نیز شرکت تواژ[2] رودخانهٔ سن گذاشتند. این ماشین بخار، ۶۰٪ کل کار بازده داشت و ماشین اتری ۴۰٪ مانده را جبران می‌کرد. برای هر اسب محاسبه شده در ساعت ۱/۲۵ کیلوگرم زغال می‌سوزانید، که در آن زمان رقم خوبی بود. اما همه این مشخصات ثابت می‌کنند که این ماشین بدقت، مطالعه و بخوبی ساخته شده و نیز مصرف زغال آن بسیار مناسب بود. سطوح کندانسورها از یک ماشین معمولی بسیار بیشتر بود: ۸۰۰ متر مربع در ۱۰۰۰۰ لوله. ساختن آنها را می‌توان از افتخارات تکنیک شمرد و موجب پیشرفتی شد که روی صنعت آینده کندانسورهای سطحی تأثیر داشت. در مورد خود ماشینهای بخار مرکب باید گفت که آتش‌سوزیها آنها را بی‌اعتبار ساخت. با این‌همه، مقدار اتر موجود در کشتیها بسیار کم بود و مطمئناً خطر آن بسیار کمتر از خطر دهها تن بنزینی بود که هواپیماهای جدید با خود حمل می‌کنند. به‌هرتقدیر، دو ماشین ۷۰۰ اسبی که آقای کاوه در سال ۱۸۵۸ فراهم کرده بود تنها با بخار آب، و تبادلگرهای حرارتی آنها با کندانسورهای سطحی کار می‌کردند و کار آنها بسیار منظم بود. دلیل اهمیت یافتن زیاد این قضیه، همین کاربرد کندانسور بود.

حدود سال ۱۸۶۰ آغاز دوران بیست ساله‌ای است که طی آن تکامل روزافزونی در این قسمت انجام گرفت. این سیستم از آن زمان به بعد کار می‌کرده است. پیگیری جزئیات کاربردها نه امکان و نه سودی دربر دارد. حدود سال ۱۸۶۰ در جهان آنگلوساکسون آقایان راون و هورتن دست به‌کار

1. Arnaud-Touache 2. Touages

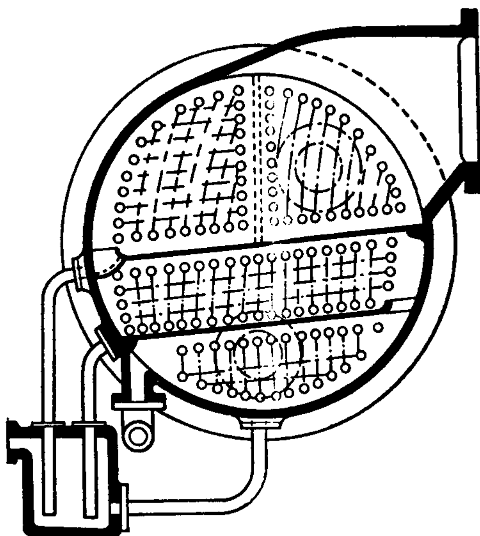
ساخت منظم تعدادی ماشین بخار پرفشار کشتی با کندانسور سطحی شدند. در سال ۱۸۶۱ در فرانسه بنژامن نورمن یک کندانسور سطحی روی ناو *Albert* نصب کرد. پس از این کار، دو یا سه نصب دیگر از همین نوع اجرا شد. خلاصه، از ۱۸۶۲ تا ۱۸۶۷ این سیستم گام‌به‌گام در کشتیها رواج یافت و با فشار زیاد کار می‌کرد، به‌طوری‌که می‌توان گفت که در سالهای ۱۸۷۰ تا ۱۸۷۵ کاربرد آن عمومی شد. به برکت وجود این سیستم از سال ۱۸۸۰ توانستند فشارکاری دیگ را با استفاده از ماشینهای چند انبساطی بالا برند. در جریان این دورهٔ توسعه است که گذاشتن آب سرد در لوله‌ها، بدون اینکه بتوان مشخص ساخت که درکجا این رسم پایه‌گذاری شد، متداول گردید.

دربارهٔ کندانسور با سطح خاکی، که گویا با ماشینهای پیستوندار همراه بود، باید گفت که بویژه در توربینها نقش مهمی داشته است.

در واقع بازده یک ماشین پیستوندار، چنانچه میزان خلأسازی افزوده شود، کمی بالا می‌رود، اما در مورد توربینها وضع کاملاً تفاوت می‌کند. فرض کنیم ماشینی با فشار متوسط سه کیلوگرم کار می‌کند. چنانچه میزان خلأ را از ۰٫۱ کیلوگرم به ۰٫۰۵ کیلوگرم بالا بریم تنها ۱٫۶۰ کار محاسبه شده را به‌دست خواهیم آورد. چرا؟ زیرا در یک ماشین پیستوندار، دتانت نمی‌تواند تا فشارکندانسور پیش برود. اما در توربینها، وضع کاملاً معکوس است. به همین دلیل پیدایش توربینها آغاز تحول تازه‌ای برای کندانسورها بود؛ تحولی برای دستیابی به خلأهای بیشتر ازگذشته.

همچنین تکامل نیروگاههای حرارتی توربینی در زمانی‌که کندانسور بیش از هرچیز یک ضمیمهٔ ماشینهای کشتی بود، سبب شد که این وسیله به تکاملی بسیار بالا دست یابد. با این‌حال، این را باید گفت که چیز زیادی برای تکامل کندانسور وجود نداشت، وسیله‌ای که تا آن زمان، جز اینکه ابعاد آن بسیار بزرگ شده بود، تغییر بنیادی نکرده بود. اما سطح خنک‌کننده باز هم از ردیفهایی از لوله‌ها تشکیل می‌شد که آب در آنها جریان می‌یافت (شکل ۷۲). در عوض می‌توان پیشرفتی در قدرت میعان دستگاه تشخیص داد. در سالهای ۱۸۷۰ ـ ۱۸۸۰ زمانی‌که این دستگاه در کشتیها رواج واقعی یافته بود، بسادگی سطحی برابر سطح دیگ بخار برای آن تعیین شد که قدرت میعان آن را از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم بخار در هر ساعت برای هر متر مربع بالا برد. حدود سال ۱۹۰۰ این رقم به ۲۵ تا ۳۰ کیلوگرم رسید و در سالهای میانی دو جنگ جهانی ۴۰ کیلوگرم شد.

هرچندکه فاصله دماهایی که دستگاه بین آنها کار می‌کند کم باشد باید توجه داشت که کندانسور مقداری گرما دریافت می‌کندکه حدود ۸۰٪ گرمایی است که دیگ بخار تهیه می‌کند. آب جاری در کندانسور با دمایی بیرون می‌رود که باز از دمای آب مایع شده کمتر است اما به‌طورکلی دستگاههای



شکل ۷۲.کندانسور سطحی جدید، مقطع عرضی.
بخار روی لوله‌هایی که آب سرد در آنها جریان دارد مایع می‌شود.
در این مقطع، ردیف لوله‌های آب دیده می‌شود (همهٔ آنها رسم نشده‌اند). در بالا و سمت راست، سرپوش مخزن بخار (با خطوط بریده) دیده می‌شود. استوانه از سه محفظهٔ روی‌هم ساخته شده است. بخار متراکم شده در هر یک از محفظه‌ها، از لوله‌های تخلیه جاری می‌شوند (پایین و چپ)؛ این لوله‌ها مربوط به دو پیچ و خم مایل (خطوط سیاه) و بخش پایینی استوانه می‌باشند. این مکانیسم دارای بیشترین بازده است.

سردکننده‌ای لازم است تا این مقدار گرمای هنگفت را در هوا رها سازد. دستگاههای سردکننده با آب جاری کار می‌کنند، یعنی شامل جریان هوایی هستند که در حین بالا رفتن دمایشان به‌حساب آب مقابل زیاد می‌شود؛ آب روی شبکه‌هایی می‌ریزد. سردکننده‌ها را تا مدتها تماماً از چوب می‌ساختند. این شبکه‌ها اکنون به‌شکل برجهای سیمانی بزرگ می‌باشند.

در پایان این فصل باید سخن کوتاهی هم دربارهٔ وسایل فرعی کندانسور داشته باشیم. وظایف این وسایل کاملاً اختصاصی است. تلمبهٔ جریان آب سرد شرح چندانی نمی‌خواهد. طرزکار جداگانهٔ بیرون کشیدن آب مایع شده و هوا تبدیل به یک قاعده شده است. وسایلی که بیش از بقیه به‌کار می‌روند نوعی تلمبهٔ دوار برای آب و نیز وسایلی از نوع دَم آبی یا تلمبهٔ بخارپاش برای بیرون کردن هوا می‌باشند. این دستگاهها خیلی کمتر از کندانسورهای قدیمی تزریقی، آب‌وهوا برای بیرون کشیدن دارند زیرا هر دو شار تنها از بخار مایع شده آمده‌اند، نه از آب خنک‌کننده.

۲

موتورهای هوایی

در اواخر سدهٔ هجدهم، پس از موفقیتهایی که ماشین بخار وات به‌دست آورد، اندیشهٔ جانشین کردن شارهٔ دیگری مانند: الکل، اتر، جیوه و ... باد گرم به‌جای بخار، برای بهتر شدن بازده پیشنهاد شد. این موتور اساساً از دو استوانه تشکیل می‌شود که یکی گرم است و کوره‌ای دمای بالای آن را حفظ می‌کند، و دیگری سرد است و جریان هوا، دمای آن را پایین نگاه می‌دارد. یک تبادلگر حرارتی بین این دو استوانه گذاشته می‌شود. هوای گرم در استوانهٔ گرم انبساط می‌یابد و به تبادلگر یا رژنراتور رانده می‌شود تا گرمای خود را به جریان هوای سردی که از محفظه دیگر آمده است واگذارد. هوایی که خنک شده است وارد استوانهٔ خنک می‌شود در آنجا متراکم و به تبادلگر رانده می‌شود تا در آنجا گرم شود. این هوا به استوانهٔ نخست برمی‌گردد و مقدار تازه‌ای گرما دریافت می‌کند و منبسط می‌گردد. این چرخه تکرار می‌شود.

در سال ۱۷۹۷ آقای جیمز گلیز بروک[1] مهندس انگلیسی موتوری طرح کرد که می‌بایست به‌شکل زیر کار کند: هوا را متراکم سازد، بوسیله کوره‌ای در خارج، هوای متراکم را گرم کند و آن را در سیلندر موتوری براند تا با دتانتی که متحمل می‌شود بتواند کار مفیدی انجام دهد. گلیز بروک

1. J. Glazebrook

همچنین پیشنهادی برای بازیابی گرمای گازهای خروجی از طریق بازگردانیدن آنها به کوره، ارائه داد.

چرخهٔ موتور استرلینگ: اما به‌هرحال، سال ۱۸۱۶ را سال پیدایش موتورهایی (با چرخهٔ) هوایی می‌دانند. در این سال آقای رابرت استرلینگ، کشیش اسکاتلندی یک موتور هوایی با مدار بسته را پیشنهاد کرد؛ طرح وی برپایهٔ چرخه‌ای استوار بود که به نام خود وی شناخته شد.

این مدار بسته فرضاً همان شارهٔ موتور را باز به گردش می‌انداخت (خنک شدن، تراکم، گرم کردن دوباره، و دتانت) که به‌طور پیوسته و بدون ارتباط با خارج اجرا می‌شدند.

نخستین موتور قابل استفاده را آقای استرلینگ و برادر وی جیمز، تنها توانستند در سال ۱۸۴۴ یعنی پس از مدتها آزمایش که از سال ۱۸۱۸ آغاز شده بود، بسازند.

این موتورکه بخصوص در ریخته‌گری داندی[1] خدمت می‌کرد از یک استوانهٔ موتور رفت‌وبرگشتی و دو استوانهٔ مولدهای گرما ـ که بتناوب کار می‌کردند ـ تشکیل می‌شد. در شکل ۷۳ مقطع یکی از این استوانه‌های مولد گرما و شکل خاص پیستونی که هوا را از محفظهٔ سرد (قسمت بالایی استوانه) در محفظهٔ گرم (قسمت پایینی) آنکه در بالای یک کوره قرار دارد می‌راند و متقابلاً یک حجم ثابت که مشخصه چرخهٔ استرلینگ است دیده می‌شود. این استوانه حرکت‌دهنده از طریق دو سر خود متناوباً با محفظهٔ گرم و محفظه سرد مرتبط می‌شود. پیستون موتور در اثر اختلاف فشار موجود با هریک از این دو محفظه‌ها فعال می‌شود. در شکل بالا همهٔ اجزای ساختمانی که طبیعتاً از ماشین بخار با بازوی نوساندار اقتباس شده‌اند، دیده می‌شود.

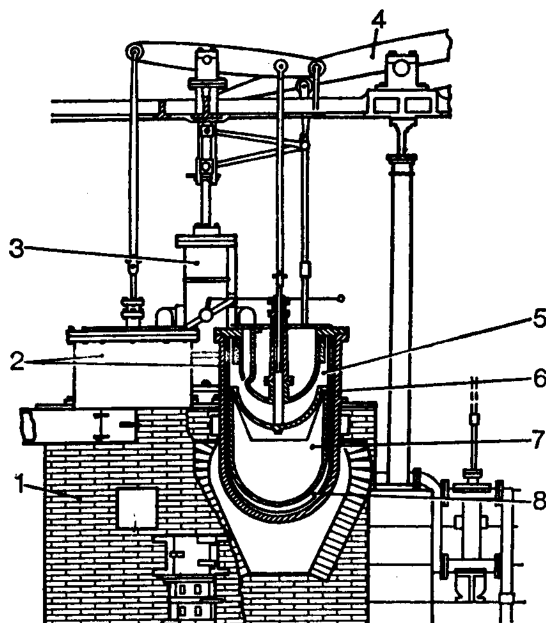
اتلاف هوا در نتیجه کامل نبودن هوابندی در مدار بسته بوسیله یک تلمبه جبران می‌شود. موتور استرلینگ ۲۱ اسب قدرت داشت و ۵۰ پوند زغال در ساعت مصرف می‌کرد.

چرخهٔ موتور اریکسن: در ساخت موتورهای هوایی، پس از آقای استرلینگ، چهره درخشان دوم، ماشین‌ساز سوئدی تبار امریکا با نام جان اریکسن مقام دارد. او در سال ۱۸۲۶ موتور نخست خود را با کمربندهای جداگانه‌ای برای دوباره گرم کردن هوا و دیگری برای سرد کردن آن ساخت. این موتور بدون ژنراتور بود. اریکسن در سال ۱۸۳۳ نخستین اختراع خود را برای یک موتور دارای ژنراتور به ثبت رسانید.

نوآوری آقای اریکسن در پدید آوردن چرخهٔ تازه‌ای از کارها بود و به همین جهت در سال ۱۸۵۱ امتیاز آن را به ثبت رسانید. چرخهٔ آقای اریکسن نوعی چرخهٔ باز، برای دوباره گرم‌سازی است که از طریق عبور هوا در رژنراتورهای با فشار ثابت عمل می‌کند.

در این چرخهٔ باز، هوا از اتمسفر مکیده و در آن رانده می‌شود. عبور هوا در رژنراتور با فشار

1. Dundee



شکل ۷۳.موتور هوایی استرلینگ در ۱۸۴۴.

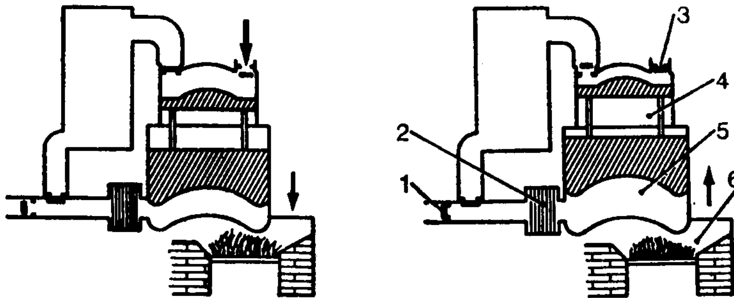
۱. کوره؛ ۲.سیلندرهای ژنراتور (دو عدد)؛ ۳. سیلندر حرکت‌دهنده ۴. شاهنگ (دسته پیستون موتور را با میل‌لنگ مرتبط می‌سازد)؛ ۵. محفظهٔ سرد؛ ۶. ژنراتور؛ ۷. پیستون؛ ۸. محفظهٔ گرم.

ثابت، نه با حجم ثابت، که در استرلینگ با آن برخورد کردیم، انجام می‌گیرد (شکل ۷۴).

اریکسن نخست یک موتور ثابت با دو سیلندر حرکت‌دهنده ساخت، بعداً در ۱۸۵۲ موتوری با چهار سیلندر عمودی در یک راستا، برای نصب در کشتی بخاری اقیانوس‌پیمای اریکسن ساخت که در سال ۱۸۵۳ به آب انداخته شد. این موتور ۹ دور در دقیقه می‌گردید و گویا ۲۵۰ اسب قدرت داشت.

موتورهای کوچک با چرخهٔ هوایی: اریکسن تنها کسی بود که چند موتور بزرگ ساخت که ماشینهای بخار، در بهترین دوران کار خود، نتوانستند جانشین آنها شوند. اما مکانیسین‌هایی که مدلهای گوناگونی از موتورهای کوچک هوایی ساختند متعدد بودند. در فرانسه می‌توان از این عده از، مهندس معادن، بوردن (از سال ۱۸۳۶)، فرانشو[1] (از سال ۱۸۳۸)، فارکو (۱۸۵۵)، لوبرو[2] (۱۸۶۰)،

1. Franchot 2. Laubereau



شکل ۷۴.موتور هوایی اریکسن در ۱۸۵۲.
شکلها مربوط به‌هنگام ورود هوای جوّ و نیز هنگام حرکت می‌باشند.
۱. سوپاپ تخلیه هوا در جوّ؛ ۲. ژنراتور گرما؛ سوپاپ ورود هوای اتمسفر؛ ۴.سیلندر متراکم‌کنندهٔ هوا؛ ۵. سیلندر حرکت‌دهنده؛ ۶. کوره.

بلو[1] (۱۸۶۰)، ژیرار (۱۸۶۷) نام برد؛ در اتریش از: لمان (۱۸۶۹)، هوکه[2] (۱۸۷۸)؛ در ممالک متحده امریکا از: اریکسن (۱۸۲۶)، ویلکوکس (۱۸۶۳)، شاو (۱۸۶۷)، رایدر[3] (۱۸۷۸)؛ در انگلستان از: کیلی[4] (۱۸۳۰) و براون (۱۸۸۶) نام برد.

فرانشو در سال ۱۸۵۳ اختراعی را به ثبت رسانید که در آن اجزای چرخهٔ کاملی از نوع استرلینگ در یک سیلندر عملی می‌شد، به‌عبارت دیگر از یک سیلندر هم برای گرم و سرد کردن هوا و هم برای حرکت دادن دستگاه استفاده می‌کرد.

آقای لوبرو در سال ۱۸۶۰ موتوری ساخت که با مدار بسته کار می‌کرد، موتوری مشابه استرلینگ اما بدون رژنراتور خاص؛ و پیستون مولد باد تا حدودی این نقش را بر عهده داشت. موتور وی، همچنین یک سیلندر مولد هوای گرم و سرد داشت. هوای محفظه گرم در سیلندر گرم‌کنندهٔ هوا امکان رفتن به محفظه سرد را داشت و نیز عکس این قضیه به‌وسیله یک خلأ حلقه‌ای که بین جدار سیلندر و پیستون قرار داشت، انجام می‌شد. موتور لوبرو که چهارهنگامی بود با دو رفت کامل هر پیستون تکمیل شد. فشار درون موتور را یک سوپاپ مکشی، ثابت نگاه می‌داشت. این موتور برای قدرتهای کوچک تا یک اسب به‌کار می‌رفت و ۵۰۰ دور در دقیقه می‌گردید. این موتور در نمایشگاه سال ۱۸۶۷ پاریس عرضه شد.

موتور لمان در سال ۱۸۶۹ ساخته شد. این موتور هم برپایهٔ چرخهٔ استرلینگ کار می‌کرد. این

1. Belou 2. Hoke 3. Rider 4. Cayley

موتور تنها یک سیلندر افقی داشت که یک سر آن را گرم و سر دیگر را سرد می‌کردند و درون آن، در انتهای سرد، یک پیستون حرکت‌دهنده قرار داشت و در انتهای گرم یک پیستون روبشی بود. هوا از محفظهٔ گرم از زیر پیستون روبشی وارد محفظهٔ سرد می‌شد. محفظهٔ سرد، فضایی بین پیستون روبشی و پیستون حرکت‌دهنده بود. این موتور در نمایشگاه سال ۱۸۷۳ وین عرضه شد و حدود ۱۳۰ نمونه از آن طی دو سال برای صنایع کوچک آلمان ساخته شد.

آقای جان اریکسن پس از سال ۱۸۵۸ تعدادی موتور با چرخهٔ هوایی طرح کرد که اکثراً در ممالک متحده امریکا ساخته شدند و سالهای دراز هزاران نمونه از آنها فعال بودند. موتور وی دارای سیلندر افقی بود که از ۰٫۵ تا ۲ اسب قدرت داشت و برپایهٔ یک چرخهٔ باز گرم‌سازی هوا کار می‌کرد.

علاوه‌بر موتورهایی که شرح آنها داده شد، نوع با مدار یا نوع با مدار باز همراه با رژنراسیون، ماشین‌سازان متعدد، یکنوع موتور با مدار باز بدون گرم‌سازی دوبارهٔ هوا پیشنهاد کردند. چرخهٔ کار طراحی شدهٔ آنها همان است که اکنون در توربینهای گازی دیده می‌شود.

این موتور از یک تلمبهٔ متراکم‌کنندهٔ آدیاباتیکی (بیدررو) هوای جوّ تشکیل می‌شد. این تلمبه سپس هوا را بدرون کمربندی می‌راند تا در آنجا بوسیلهٔ یک کویل گرمکن، در فشار ثابت گرم شود. این هوای گرم که در سیلندر حرکت‌دهنده وارد می‌شد متحمل دتانت گشته و مستقیماً در جوّ تخلیه می‌شد. این همان نوع موتوری است که جیمز گلیز بروک انگلیسی در سال ۱۷۹۷ پایهٔ آن را گذارد. برای شناختن این موتور باید با کارهای جورج کیلی (۱۸۳۰)، بوردن (۱۸۳۶)، بلو (۱۸۶۰)، استفن ویلکوکس (۱۸۶۳)، شاو (۱۸۶۷)، هوکه (۱۸۷۸) و براون (۱۸۸۶)، آشنا بود.

آقای بلو در سال ۱۸۶۰ در اندیشه بود که به‌جای کویل گرمکن از ظرفی استفاده کند که اجاقی داشت که زغال روی آن بوسیلهٔ هوایی که تلمبه می‌دمید سرخ می‌شد. مخترعان دیگر که از آن جمله می‌توان از آقایان بنیه[1] و ژانتی[2] را نام برد کوره را درون خود سیلندر حرکت‌دهنده جا دادند و بدین‌ترتیب، موتور هوایی برونسوز را به موتور درونسوز تبدیل کردند.

آزمایشهای متعددی تا زمان درگرفتن جنگ جهانی اول ادامه داشتند اما این نوع موتور نتوانست در صنعت مورد استفاده قرارگیرد. از نواقص عمدهٔ این موتورها، مقدار بازده و توان جرمی بسیار ناچیز آنها است و علت آن دشواری ساخت تبادلگرهای حرارتی شایسته در رژنراتورها و دشواری روغنکاری سیلندر گرم و ... است.

اما گرچه اهمیت کاری موتورهای هوایی، تا حدود سال ۱۹۶۰، بسیار کم بود. فواید نظری

1. Benier 2. Genty

آن واجد اهمیت بود زیرا در پیشبرد و نظریهٔ ترمودینامیکی موتورها سهیم است. مثلاً، تراکم قبلی گازها، خیلی پیشتر از آنکه در موتورهای درونسوز انجام شوند در این نوع موتورها عملی شدند.

موتورهای جدید با چرخهٔ هوایی: در برههٔ ۱۸۱۸ تا ۱۸۳۸ موتورهای هوایی بکلی کنار گذاشته شدند؛ در این سالها شرکت فیلیپس در شهرهای آینتهوون[1] در هلند، یک برنامهٔ تحقیقاتی روی موتورهای نوع استرلینگ را آغاز کرد. این تحقیقات که در سال ۱۹۵۸ جنرال‌موتورز کورپوریشن در آن شرکت کرد در پرتو پیشرفتهای متالورژی و تکنیکهای نوین مربوط به انتقال گرما، به‌ساخت و راه انداختن پیش‌نمونه‌هایی انجامید که در قسمت قدرت جرمی و بازده می‌توانند با موتورهای درونسوز رقابت کنند.

آنها همچنین از لحاظ نرمی کارکردن، بی‌سروصدایی، دوام، نگاهداری، امکان کاربرد سوختهای گوناگون، مانند انرژی هسته‌ای و خورشیدی، امکان کارکردن در هر محیطی: خلأ، آب و غیره مزایای متعددی دارند.

همان‌طورکه چرخهٔ استرلینگ از لحاظ نظری دارای بازدهٔ ترمودینامیکی بسیار بیشتر از موتورهای درونسوز است، جابه‌جا کردن با استفاده از تبادلگرهای گرمایی، نزدیک شدن به نوعی تحول همدما را ممکن می‌سازد. راه‌حلهای سینماتیکی متعددی برای تحقق چرخهٔ استرلینگ به‌وسیله شرکت فیلیپس پذیرفته شدند: یک سیلندر رفت‌وبرگشتی به‌شکل V، و غیره. حدود سال ۱۹۶۵ پیشرفته‌ترین موتور فیلیپس، دارای یک سیلندر بود که دو پیستون داشت: یک پیستون حرکت‌دهنده و یک پیستون روبشی؛ هر دو پیستون به دو میل‌لنگی با زاویه‌ای مناسب مربوط می‌شدند، آنها طوری جابه‌جا می‌شدند که گذر هوا را از طریق رژنراتور در پایان هنگام حرکت و در پایان هنگام تراکم با حجم ثابت، ممکن سازند. دسته پیستون بالایی (روبنده) پیستون حرکت‌دهنده (پایینی) را در یک جعبهٔ آب‌بندی‌شده به پیش می‌راند. محفظهٔ گرم بین سر سیلندر و رخ بالایی پیستون روبنده است و محفظهٔ سرد، بین دو پیستون قرار دارد. یک چرخهٔ کامل (سرد شدن، تراکم، گرم کردن، دتانت) در دو رفت کامل هر پیستون اجرا می‌شد.

بازده چنین موتورهایی در دماهای کار ۸۰۰ درجه و ۱۵۰۰ دور در دقیقه به ۴۰٪ می‌رسید، و برای دماهای ۵۰۰ درجه‌ای، ۳۰٪ بود. قدرت این موتورها می‌توانست تا ۵۰۰۰ اسب بالغ شود درحالی‌که حجم و وزن آنها برابر موتورهای دیزل بود.

این نوع موتور در پرتو خصوصیات بی‌سروصدایی و نداشتن لرزش، در زیردریاییها کاربرد بسیار مؤثری یافت. برای سفینه‌های فضایی این برتری را دارد که می‌تواند مدتها کار کند و از انرژی

۱. Eindhoven شهری در هلند، در برابانت شمالی

خورشیدی بهره جوید. این موتور همچنین در برخی تأسیسات ماشین‌کاری یا در تحقیقات مربوط به کیفیت بی‌سروصدایی، حداقل کار نگهداری، دوام و غیره به‌کار گرفته می‌شود.

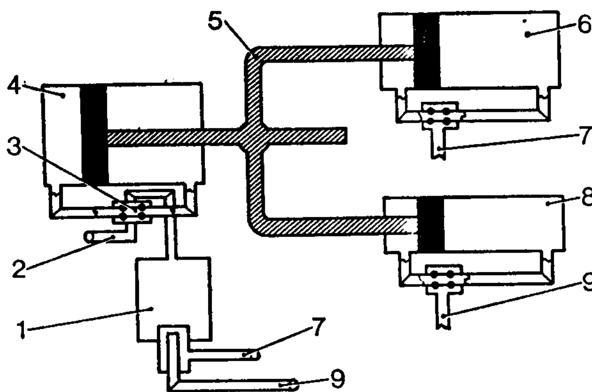
کاربرد آن برای حرکت دادن خودروهای زمینی، به‌علت مقدار فراوان آب مصرفی لازم برای خنک کردن هنوز پیشنهاد نشده است.

۳

موتورهای درونسوز

اختراع موتورهای درونسوز و گسترش صنعتی آنها، یکی از حوادث تکنیکی پایان سدهٔ نوزدهم است، حوادثی که در شکل دادن ساختارهای تمدن نیمهٔ دوم سدهٔ بیستم بیشترین سهم را دارند.

اصطلاح درونسوز، ناظر به تفاوت این وسیلهٔ جدید تولید انرژی با ماشین بخار است که همهٔ تمدن سدهٔ پیشین روی آن بنا شده بود. کوره و دیگ بخار که شارهٔ حرکت‌دهنده در آن به‌وجود می‌آید، بیرون از سیلندر پیستوندار، یا همراه توربینها می‌باشند که انرژی برخاسته از انبساط بخار را گرفته و انتقال می‌دهند. در اینجا، برعکس، انبساط شارهٔ حرکت‌دهنده ـ نتیجهٔ سوختن در درون موتور است ـ ، خصوصیتی که در همهٔ موتورهای گوناگون درونسوز، اعم از پیستوندار یا بدون پیستون، که واکنشی هستند ـ موشک یا توربین ـ وجود دارد. در واقع، این جنبهٔ دیگری از اصل درونسوزی است، که پس از گذرانیدن حدود یک سده دورهٔ کمون تقریباً کلاسیک با داشتن سیلندر پیستوندار از نظر تکنیکی اشباع شده بود به تکنیکهای کاربردی دیگری راه یافت و فواید آن به‌طور کامل تجدید گردید. اما باید گفت که موتورهای کلاسیک پیستوندار، ماشینهای بخار متناوب را قبلاً به‌طور کامل از صحنه بکلی بیرون کرده بودند.



شکل ۷۵.موتور گازی فیلیپ لوبون، اختراع سال ۱۸۰۱.

۱: محفظهٔ احتراق؛ ۲: خروج گازها؛ ۳: مقسم جریان برق؛ ۴: سیلندر حرکت؛ ۵: بازوهای یکپارچهٔ اتصال‌دهندهٔ سرپیستون؛ ۶: تلمبهٔ هوا؛ ۷: مجرای هوا، بین تلمبهٔ هوا و محفظهٔ احتراق؛ ۸: تلمبهٔ گاز؛ ۹: مجرای گاز، بین تلمبهٔ گاز و محفظهٔ احتراق.

موتورهای پیستوندار

مراحل اولیهٔ یک ابتکار: اگر بخواهیم تاریخ اختراع این وسیله را حدود سال ۱۸۶۰ تعیین کنیم، باید بدانیم که بسیار پیشتر از این زمان میل شدید به استفاده از احتراق در یک ظرف سربسته بوسیلهٔ یک پیستون وجود داشته است.

آزمایشهای هویگنس و پاپن (مجلد دوم، صفحه ۶۱۸)، و نیز کارهای ایزاک دوریواز (مجلد سوم، صفحهٔ ۳۷۹) را به‌یاد آوریم. لازم است که نامهای کسان دیگری را هم به نامهای این پیشگامان افزود ـ کسانی که همگی در این کار با شکست روبه‌رو شدند. نخست با نام دو انگلیسی: جان‌باربر (در ۱۷۹۱) و رابرت استریت (در ۱۷۹۶) آشنا می‌شویم؛ آن‌گاه با فرانسویانی با نامهای: فیلیپ لوبون در ۱۸۰۱ (شکل ۷۵) و برادران نیپس (در ۱۸۰۶). کاملاً محتمل است که وسیلهٔ برادران نیپس با نام Pyréolophore ساخته و آزمایش شده‌اند، بعدها در این رشته، کوششها فزونی گرفت. پس از ویلیام سسیل که بی‌تردید در سال ۱۸۲۰ نوعی موتور جوّی (اتمسفری) که با هیدروژن کار می‌کرد ساخت، سه سال بعد آقای سمیوئل براون یک موتورگازی طرح کرد. که آن‌هم اتمسفری بود، و برای کاربرد آن شرکتی تشکیل داد که گویا حدود ده سالی کارهای وی را دنبال می‌کرد. پس

از وی، امتیازات به ثبت رسیده و آزمایشهایی در ساخت به نام آقای سمیوئل ماری[1] در ۱۸۲۶، ویلیام رایت در ۱۸۳۳، ویلیام بارنت[2] در ۱۸۳۸ وجود دارند.

اقدامات دیگری در برههٔ ۱۸۴۰ ـ ۱۸۶۰ انجام گرفته است. در امریکا آقای آلفرد دریک[3] در ۱۸۴۳ دست به ساختن آن زد، اما تا ۱۸۵۵ آن را به ثبت نرسانید؛ کسانی از ایتالیا با نامهای برسانتی[4] و ماتئوتچی[5] ۱۸۵۳ ـ ۱۸۵۴ به ساخت آن اقدام کردند. موتور دریک، که پیش‌نمونهٔ موتوری است که آقای لنوار در ۱۸۶۰ آن را ساخت، نوعی موتور دوهنگامه و دوطرفه است که با مخلوط هوا و گاز غیرفشردهٔ روشنایی کار می‌کرد. بعدها گفته شد که ساختهٔ وی از نوع موتور با عمل مستقیم (موتور معمولی) بوده است زیرا فشاری که روی پیستون وارد می‌شد تنها در نتیجهٔ دتانت گازهایی گرم سوخته شده بود. برای نخستین بار در این موتور یک لولهٔ چدنی که تا حد سرخی گرم می‌شد به‌کار رفته بود؛ این لوله را در میان مسیر پیستون می‌گذاشتند تا اشتعال را برانگیزد. با این روش با موقعیتهای دیگری نیز برخورد داریم. قدرت این موتور ۲۰ اسب بود و در هر دقیقه ۶۰ دور می‌گردید سرعتی که در آن زمان نسبتاً زیاد بود. موتور ساخت ایتالیاییها، که مربوط به ده سال بعد بود، پیش‌نمونه موتور اتمسفری شد که آقای ن. ا. اوتو در سال ۱۸۶۳ آن را ساخت.

سرانجام، کمی پیش از ساختهای نهایی، در سال ۱۸۵۸، آقای دوگران[6] فرانسوی، یک موتور گازی را به نام خود به ثبت رسانید که در آن زمان طرح بسیار پیشرفته‌ای داشت.

آقای دوگران پس از بارنت دومین کسی است که استفاده از تراکم اولیهٔ گاز را در نظر داشته است و همچون وی از اهمیت این کار غافل بوده است. هوا در آغاز هنگام تنفس، تنها از سوراخهایی وارد سیلندر می‌شد. سپس سوارخها مسدود می‌شدند و طی مدت نیمی از رفت پیستون، هوا تا حدود ۱٫۲ فشرده می‌شد. در این لحظه، تلمبه‌ای گازی روشنایی را با همین فشار وارد سیلندر می‌ساخت و طی مدت بقیهٔ رفت پیستون، مخلوط هوا و گاز فشرده‌تر می‌شدند. در هنگام دوم کار موتور، گازهای سوخته شده، با دتانت خود تولید کار مفید می‌کردند و حدود پایان رفت، تخلیه می‌شدند. در اینجا همهٔ مکانیسم موتور دوهنگامهٔ با فشرده‌سازی مقدماتی در داخل سیلندر، که پس از سال ۱۸۷۹ ساخته شد به چشم می‌خورد. اما تخلیه گازهای سوخته، چون تأمین نیست، کار موتور ناقص است. نخستین اطلاعات دورهٔ کارهای آزمایشی که طی آن موتور درونسوز «اختراع شد اما کار نکرد» حدود سال ۱۸۶۰ به پایان رسید. این موتور درونسوز، چه از نظر ساخت و چه از لحاظ کار، در کنار همتای بزرگتر خود، ماشین بخار، قرار گرفت. طرح لوبون نمونه‌ای از شباهت

1. S.Moray 2. W.Barnett 3. A.Drake 4. Barsanti 5. Matteucci 6. Degrand

شگفتی‌آور این دو می‌باشد. اما در همان زمان از سوختهای دیگری هم استفاده شد و به سیستمها و راه‌حلهای تازه‌ای دست یافتند که در وهلهٔ نخست به سیستمهای کمکی ویژهٔ موتورهای درونسوز مربوط می‌شد (سیستمهای اشتعال، خنک کردن، سوخترسانی).

موتور درونسوز، بدنه و مکانیسم حرکتی (سیلندر، پیستون، بازوی لنگ و غیره) و مکانیسم انتقال نیرو را از ماشین بخار اقتباس کرده است. مانند موتور جوّی ساخته‌شده (ا. دوریواز، و. سسیل، س. براون، س. ماری، برسانتی ـ ماتئوتچی) یا با مکانیسم عمل مستقیم یکطرفه یا دوطرفه (لوبون، و. رایت، و. بارنت، ا. دریک، دوگران). چرخهٔ کار آن دو هنگامی و بدون تراکم اولیه بود، گرچه آقایان بارنت و دوگران از تراکم اولیه استفاده می‌کردند.

سوختهای گوناگونی ـ معمولاً گازی ـ آزمایش شدند: گاز روشنایی، هیدروژن و غیره. سوختهای مایع: تربانتین، الکل، هیدروکربورها نیز که پیدایش نخستین سوختها (کربوراتور) را سبب گردیدند (س. ماری) بررسی شدند. ورود هوا و سوخت در سیلندر یا به‌طور جداگانه انجام می‌گرفت یا همزمان با تنفس بوسیلهٔ تلمبه. انواع گوناگون اشتعال مورد آزمایش قرارگرفتند: اشتعال با برق (لوبون، ریواز، برسانتی ـ ماتئوتچی)، با انتقال شعله، با لامپ ملتهب (دریک). این موتور در این زمان به سیستم خنک‌کنندهٔ آبی نیز مجهز بود: تلمبه‌هایی آب را در فضای اطراف سیلندرها می‌گردانیدند (س. براون و دیگران). ساخت چندین سیلندری نیز وجود داشت (س. براون) و نیز تنظیم سرعت بوسیلهٔ رگولاتور وات (رایت).

نقش تأخیری ترمودینامیک: همراه با این نخستین ماشینهای مخترعانی که کار خود را بر پایهٔ آزمایش و بدون توجه به‌نظریهٔ ترمودینامیک به پیش می‌بردند، ترمودینامیک نیز به‌عنوان دانشی نوین، بعدها در پیشرفت موتورهای درونسوز، نقش مؤثری داشت. درگذشته دربارهٔ کارهای سعدی کارنو که در سال ۱۸۲۴ منتشر شدند سخن گفته‌ایم (رجوع کنید به مجلد سوم صفحات ۱۱۷ و ۱۳۸ و نیز صفحه ۷۰ همین مجلد).

گرچه ترمودینامیک در سالهای ۱۸۶۰ به شاخهٔ مستقلی از فیزیک تبدیل و به‌کار گرفته شد، در اینجا نخستین موتورهای درونسوز قابل استفاده‌ای که در سال ۱۸۶۰ ساخته شدند هیچ نقشی نداشته است. این موتورها را می‌توان دستاورد تجربیات ماشین‌سازان خودآموخته‌ای نظیر لنوار، اوتو، و دیگران دانست.

این گفته‌ها مغایر تأثیر بررسیهای نظری در ارتباط نزدیک با موتورهای درونسوز نیست. این بررسیها بخصوص پدیده‌های احتراق و به‌دست آوردن کار مفید را توضیح می‌دادند. فیزیکدانان

آلمانی ازجمله آقایان: روبرت و. بونزن، بویژه فیزیکدان فرانسوی گوستاو آدولف هیرن توجه یافتند که کار مفید در یک موتور درونسوز انفجاری بر اثر دتانت گازهای سوخته به‌دست می‌آید؛ احتراق (یا انفجار) در مدت زمان بسیار کوتاهی، تقریباً در حجم ثابت انجام می‌گیرد. باید یادآور شد که لنوار گمان می‌برد که انفجار است که پیستون را در مرحلهٔ رفت حرکت‌دهنده جابه‌جا می‌کند و از تأثیر دتانت غافل بود.

جنبهٔ مهم دیگری که آن‌هم به بررسیهای نظری این زمان مربوط می‌شود ایجاد و تجزیه و تحلیل چرخه‌های نوین طرز کار است ـ چرخه‌هایی که نتیجهٔ کاربرد نظریهٔ ترمودینامیک به‌نظر نمی‌رسیدند. پیدایش و تجزیه و تحلیل این چرخه‌ها تجربی ماندند و بر نوعی استنتاج منطقی عاری از هر پشتوانه ریاضی تکیه داشتند.

برپایهٔ همین نوع تحلیل تجربی بود که، مثلاً پس از سال ۱۸۶۰، همان‌طورکه خواهیم دید، به اهمیت تراکم مقدماتی مخلوط سوخت در افزایش بازده موتور و یافتن وسایل تحقیق عملی آن پی‌بردند.

بررسیهای نظری و عملی چرخه‌های ترمودینامیکی برای کاربرد آنها با کارهای ویلیام رنکین روی چرخه‌های ماشینهای بخار، منتشر در ۱۸۵۹ و نیزکارهای مهندس کارل ریتر فون لینده[1] ـ که در سال ۱۸۷۵، با ادعای اینکه چرخه کار ماشین سرمازای عکس چرخهٔ کار ماشین بخار است، آن را ساخت ـ پیشرفت شایانی کرد.

در حدود سال ۱۸۸۰ نخستین نوشتارهای مربوط به موتورهای درونسوز در پایه‌گذاری نظریهٔ مربوط به آنها و نیز ساخت سهم عمده‌ای داشت. ازجملهٔ این نوشتارها می‌توان از آثار آلمانیها ا. زالبی[2]، ر. شوتلر[3]، مورتیس شروتر[4]، ر. دیزل، هوگو گولدنر[5]؛ انگلیسیها: دوگلد کلرک[6]، براین دانکین[7]؛ از فرانسویان: امه ویتز و گوستاو ریشار و . . . نام برد.

آقای رودلف دیزل، شاگرد لینده، نخستین کسی بود که پس از سال ۱۸۹۲، طی مدت آزمایشهای خود که به ساخت موتوری با نام خود وی انجامید، بر تحلیل ترمودینامیکی جدیدی ـ که گاهی هم بر خطا بود ـ برای توجیه طرز کار مورد نظر، تکیه می‌کرد. موتور دیزل را می‌توان نمونهٔ درونسوز دانست که برای ساختن آن نکات ترمودینامیکی چرخه‌های انجام کار در نظر گرفته شده است.

هرچند که در حوالی سال ۱۹۰۵ همان‌طورکه آقای هـ. گولدنر اشاره می‌کند، هنوز هیچ نظریهٔ

1. K.R.von Linde 2. A.Salby 3. R.Schoẗtler 4. M.Schroẗer 5. H.Guïdner
6. D.Clerk 7. B.Donkin

ترمودینامیکی برای فهم موتور، به‌طور کامل شکل نگرفته بود، از آغاز سدهٔ بیستم، ترمودینامیک به یک سلاح نظری مؤثر برای سازندگان این وسیله تبدیل شد. بر پایه ترمودینامیک بود که محاسبات چرخه‌های کار موتورهای طرح شده و رسیدن به حداکثر بازده و حداقل ابعاد برای بعضی کاربردها و نیز تحلیل گرمایی کار موتورهای موجود انجام می‌گرفت.

موتورهای گازی

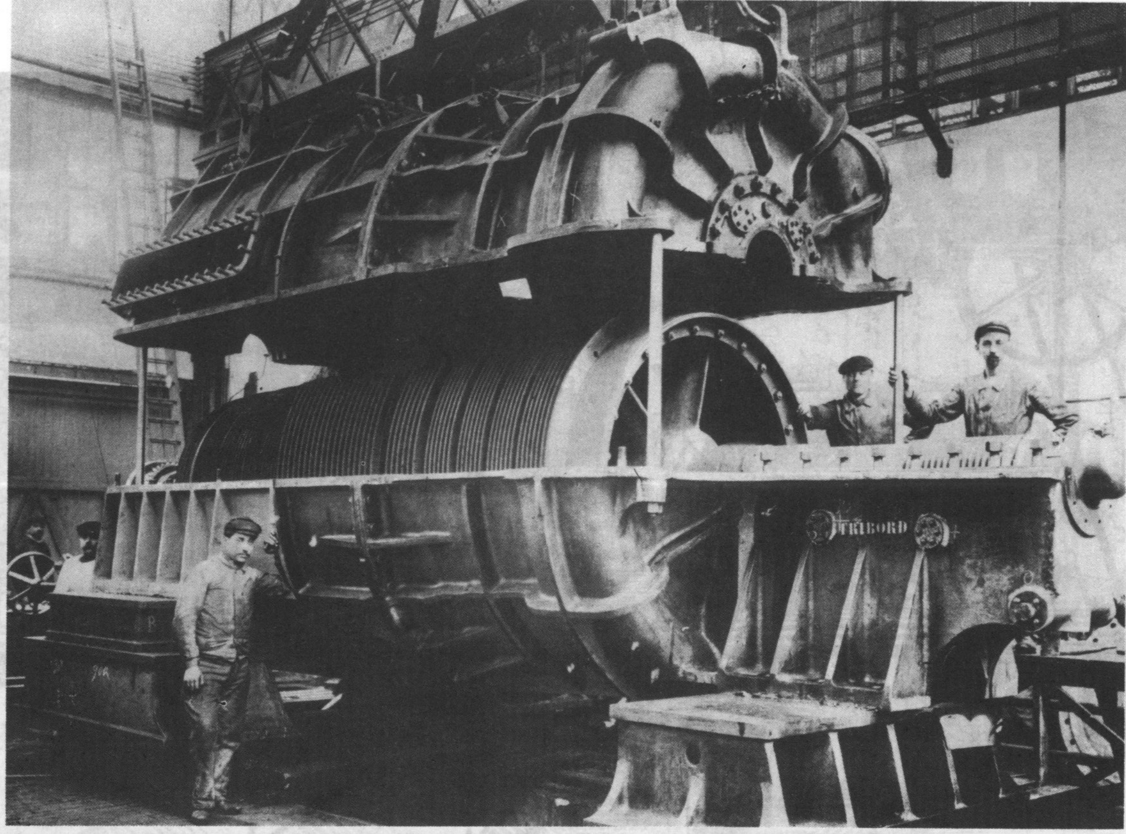
نخستین موتورهای درونسوزی که به‌کار گرفته شدند ساخته سال ۱۸۶۰ بودند. این سال مبداء تاریخ این موتورها به‌عنوان منابع انرژی است. این موتورهای نخستین کاربردی بر پایهٔ چرخهٔ موتورهای پیشین ـ دوهنگامی بدون تراکم مقدماتی ـ عمل می‌کردند، و مانند پیشینیان خود، موتورهای «انفجاری» نامیده می‌شدند زیرا عمل احتراق در آنها تقریباً در حجم ثابت و درمدت زمان بسیار کوتاهی پس از ورود کامل مخلوط احتراق در سیلندر، انجام می‌گرفت. باید توجه کرد که اصطلاح «انفجاری» بکلی نابجاست و احتراق گازها در سیلندر، نوعی واکنش شدید است که سرعت آن به‌طور محسوسی کمتر از سرعت انفجاری است.

نخستین سوختی که در آغاز به‌کار گرفته شد، گاز روشنایی بود. فراورده‌های نفتی به علت تولید صنعتی بسیار کم آنها هنوز زیاد شناخته شده نبودند.

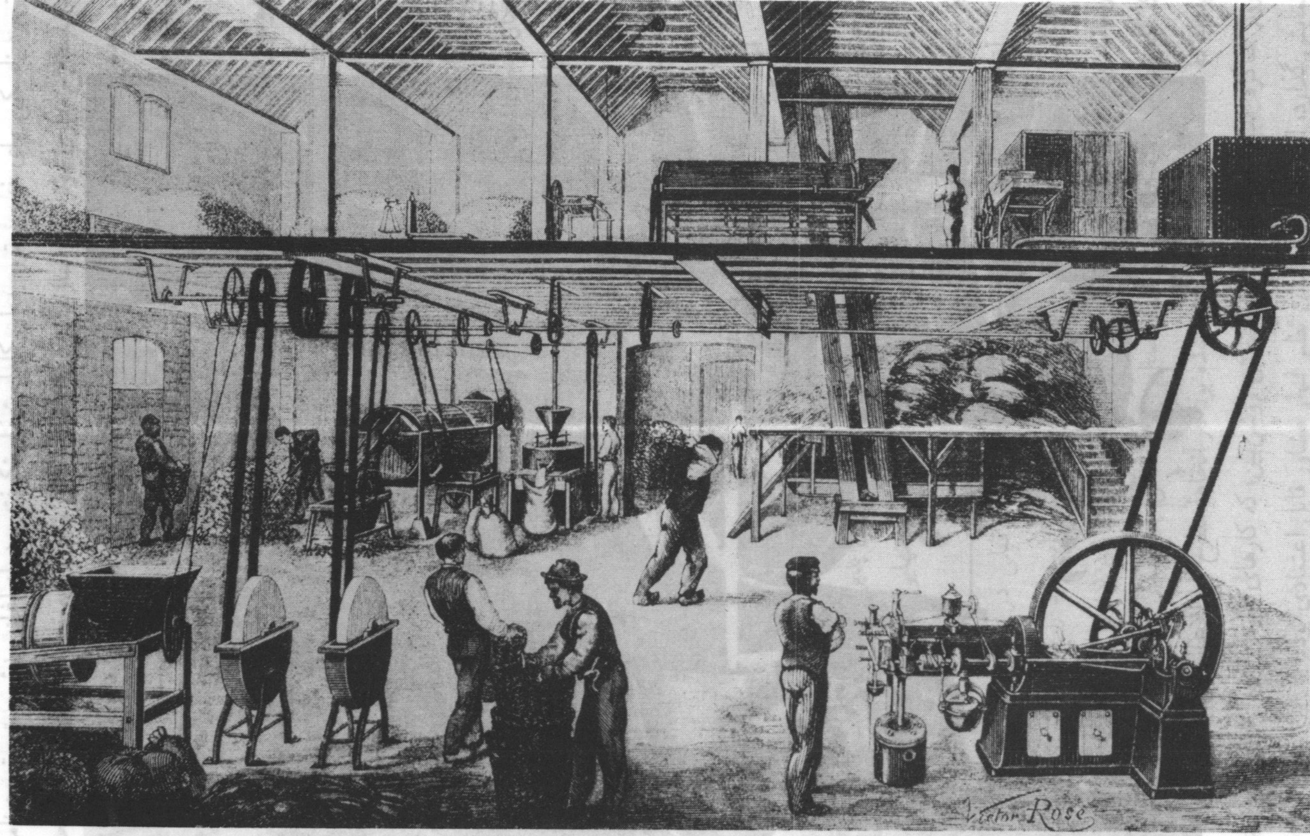
اینکه آزمایشهای قبلی تا چه اندازه به ساخت موتورهای اولیه کمک بوده‌اند کار دشواری است. چنین می‌نماید که یکی از این سازندگان با نام اوگون[1]، که مدیر شرکت پاریسی گاز سیلندری بود از کارهای پیشینیان در این مورد اطلاع کامل داشت و می‌توان پذیرفت که اطلاعات ژوزف اتین لنوار از وی بسیار کمتر بود. با این‌همه این لنوار بود که تقریباً به تنهایی، به‌کمک ویژگیها نبوغ مانند خود به نتایج رضایتبخشی رسید.

آقای لنوار که تبار بلژیکی داشت، بدون هیچ مطالعهٔ قبلی در زمینه این موتورها، در سالهای ۱۸۵۰ با چند اختراع در زمینهٔ الکتریسیته و مکانیک، نام خود را در ردیف مخترعان به ثبت رسانید و این امر بدون شک سبب شد که به چند کارگاه ماشین‌سازی رفت‌وآمد داشته باشد. بویژه کارگاههای لوفور و برادران روار[2] حدود سال ۱۸۶۰ محل جمع شدن گروه‌های تکنسین و دانشمندانی بودند که مشکلاتی که با آنها برخورد شده بود در آنجاها مطرح و اطلاعات مبادله می‌شدند. هانری روار شاگرد قدیم اکول پلی‌تکنیک، نقاش روشن‌بین، که کارهای خود را بعداً با امپرسیونیستها به نمایش گذارد، احتمالاً برای کسانی نظیر لنوار مشاور قابل اعتمادی بود.

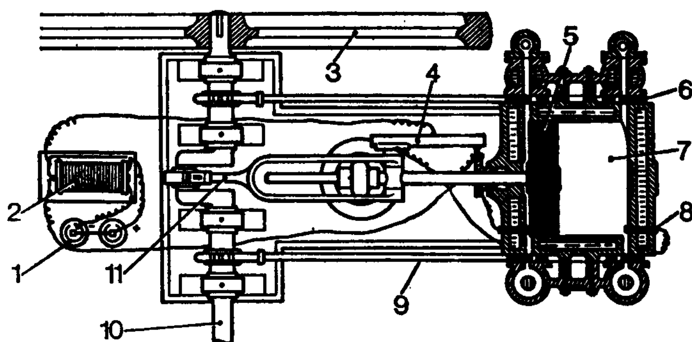
1. Hugon 2. Rouart



تابلوی ۷. توربین بخار کشتی، نوع پارسنز (۱۹۱۴).



تابلوی ۸. تأسیسات کشاورزی، که به موتور گازی مجهز شده است (حدود ۱۸۸۰).



شکل ۷۶.موتور لنوار (۱۸۶۰).

۱: پیل الکتریکی؛ ۲: قرقرهٔ القا؛ ۳: چرخ طیار؛ ۴: مقسم جریان برق؛ ۵: پیستون؛ ۶: کشوی توزیع (ورود و خروج)؛ ۷: سیلندر حرکت؛ ۸: شمع؛ ۹: میل فرمان کشوی توزیع؛ ۱۰: محور حرکت‌دهنده؛ ۱۱: شاتون.

لنوار و موتورهای دوهنگامی با عمل مستقیم و دوطرفه: به هر تقدیر آقای لنوار توانست با ترکیب اجزای شناخته شده، نخستین موتور درونسوز قابل استفاده را بسازد.

امه ویتز می‌نویسد «می‌توانند کاملاً بدرستی به ما ثابت کنند که تا پیش از سال ۱۸۶۰ هیچ ماشین گازی نتوانسته بود در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. چنین موتوری اختراع شده بود اما بایست کار می‌کرد، و این امر مدیون شایستگی آقای لنوار است». لنوار در ۲۴ ژانویه ۱۸۶۰ اختراع «موتوری که در اثر سوختن گازها هوای آن منبسط می‌شود» را در فرانسه به ثبت رسانید؛ چند ماه بعد موتور وی در کارگاهی در پاریس کار می‌کرد (شکل ۷۶).

موتور وی از نوع مستقیم (موتور معمولی) و دوطرفه بود که بر پایه چرخهٔ دوهنگامی و بدون تراکم قبلی کار می‌کرد. در هنگام نخست، مخلوط هوا و گاز در نیمهٔ نخست رفت پیستون، به داخل سیلندر مکیده می‌شد؛ با بسته شدن تنفس، جرقهٔ یک شمع الکتریکی، مخلوط را مشتعل می‌ساخت. فشار پس از احتراق به ۵ یا ۶ اتمسفر می‌رسید و در نیمهٔ دوم رفت پیستون، گازهای سوخته شده دست‌خوش دتانت شده و کار مفیدی انجام می‌دادند. در هنگام دوم طی تمام مدت رفت پیستون، گازها بیرون رانده می‌شدند. کار موتور را می‌شد بوسیله نمودار تعقیب کرد. نخستین نمونهٔ این موتور را بی‌شبهه آقای مارینونی، ماشین‌ساز فرانسوی ساخته است. اما کارگاه لوفور- روار و نیز کارگاه گوتیه و شرکا لااقل از سال ۱۸۶۱ به ساختن آن اشتغال داشتند.

بدنه، مکانیسم موتور (سیلندر، پیستون، محور حرکت‌دهنده) مشابه اجزای ماشین بخار افقی

دوطرفه بودند. توزیع بوسیلهٔ کشویی انجام می‌گرفت که لنگهایی متصل به محور حرکت‌دهنده آن را فعال می‌کرد. اختلاط هوا و گاز در کانالی انجام می‌گرفت که به سیلندر راه داشت. سیستم اشتعال الکتریکی اختراعی لنوار بسیار پیشرفته بود و اصول کار سیستمهای کنونی اشتعال الکتریکی بوسیلهٔ باتری رعایت می‌شد. این سیستم از دو جزء پیلهای بونزن یک قرقرهٔ القا و یک مقسم جریان با ولتاژ بالا تشکیل می‌شد. شمعها از یک مهرهٔ مسی قلاویز شده که یک میلهٔ چینی عایق از میان آن می‌گذشت ساخته شده بودند. سیمی هادی در دل میلهٔ چینی گذاشته شده بود. شمعها را در هر انتهای سیلندر محکم می‌کردند.

کار خنک کردن که بسیار جدی بود بوسیلهٔ آبی که جریان آزاد داشت تأمین می‌شد. گازهای سوخته شده بخصوص حرکت کشوی خروج گاز را، با وجود روغنکاری زیاد آن، مختل می‌ساخت. در مدلهای بزرگ نیز بوسیلهٔ کشوی خروج دود، کمی آب در سیلندر افشانده می‌شد تا دمای گازهای سوخته شده، کاهش یابد.

موتور لنوار را تا قدرت ۱۲ اسب ساخته‌اند. این موتور حدود سه مترمکعب برای هر اسب در ساعت مصرف داشت بازده مؤثر آن حداکثر به ۴٫۶٪ رسید. تنظیم سرعت را در ابتدا با بازو بسته کردن شیر گاز با دست انجام می‌دادند. اما آقای مارینونی توانست ورود گاز به سیلندر را با نوعی رگولاتور مرکزگریز به‌طور خودکار تنظیم کند.

موتور لنوار به‌عنوان جانشین ماشین بخار کم قدرت، در تعدادی صنایع کوچک که نیاز به یک منبع انرژی بینابینی با قدرت متوسط در آنها احساس می‌شد، موفقیت خوبی داشت. از بین رفتن فضاگیری زیاد دیگ بخار، امکان قراردادن این موتور در همه‌جا بدون شرایط خاص، بویژه این واقعیت که سوخت، تنها در زمان کار موتور مصرف می‌شد از علل استقبال از آن بودند. در فرانسه در سال ۱۸۶۵ حدود ۴۰۰ موتور لنوار به‌کار مشغول بودند و در انگلستان حدود ۱۰۰۰ دستگاه آن.

موفقیت موتور لنوار سبب شد که مغزهای فنی متعددی برای تکمیل موتورهای درونسوز فعال شوند. اوگون در سال ۱۸۵۸ پیش از لنوار موتوری ساخته بود که تقریباً مشابه ماشین لنوار بود، اما او این کار را رها کرد تا اینکه به ساخت موتورهای جوّی (اتمسفری) پردازد. پس از موفقیت موتور لنوار، او نیز حدود سال ۱۸۶۴ به ساخت موتورهای دوطرفه روی آورد.

وی در ابتدای کار، یک موتور عمودی را منظور داشت، اما پس از سال ۱۸۷۷ بنوع افقی آن روی کرد. او با در نظر داشتن نارساناییهای ماشین لنوار، چند اصلاح در طرز کار این موتور

اعمال کرد. مخلوط گاز سوختی، دیگر مکیده نمی‌شد، بلکه تلمبه‌ای آن را به‌درون سیلندر می‌راند تا تغییرات فشار که در شرایط توزیع پدید می‌آیند اختلالی در کار موتور ایجاد نکنند. در اینجا هم مانند موتورهای بزرگ لنوار، در سیلندر، آب تزریق می‌کردند تا دمای گازهای خروجی پایین آید، اما این تزریق پیش از مرحلهٔ اشتعال انجام می‌گرفت و بدین‌ترتیب فشار بخار بر فشار گازهای سوخته شده افزوده می‌شد، اما در بازدهٔ موتور تأثیر واقعی نداشت.

ورود و خروج گاز بوسیلهٔ یک کشو انجام می‌گرفت تا تبادل دما بین گازهای گرم سوخته شده و مخلوط گازهای تازه تأمین شده باشد. آقای اوگون همچنین به‌جای اشتعال الکتریکی که ناگیریهای متواتر داشت نوعی اشتعال با شعله را که مطمئنتر بود جانشین کرد.

موتور اوگون، گرچه از لحاظ طرز کار و مصرف گاز و نفت بر موتور لنوار برتری داشت، رواجی نیافت. چنین می‌نماید که اوگون می‌خواست خودش از آن استفاده کند و منابع کافی در دسترس وی نبوده است.

موتورهای دیگری هم با عمل مستقیم اما یکطرفه، در سالهای بعد ساخته شدند که از آن میان می‌توان از موتور بنیه، فوره[1] و اکونومیک موتور ساخت امریکا، موتورهای انگلیسی کیندر و کینزی[2] و موتور یولیوس هوک[3] نام برد. ماشین اخیر در سال ۱۸۷۳ در وین ساخته شد و تنها موتوری بود که بنزین مصرف می‌کرد، اما استقبال از آن زیاد نبود. ماشین‌سازانی، از جمله لنوار که کارگاهی برای خود برپا کرده بود، در سال ۱۸۶۲ از بنزین استفاده کردند اما موفقیتی نیافتند.

همهٔ این موتورها، قدرت کمی داشتند؛ ساده و زمخت بودند و ساعتها بدون نیاز به‌مراقبت کار می‌کردند، بهای گزافی نداشتند اما مصرف آنها خانه خراب‌کن بود، لااقل ۲۵۰۰ لیتر گاز برای هر اسب در ساعت، در موتورهای لنوار و اوگون.

اوتو و موتورهای اتمسفری (جوّی): انواع دیگری از موتورهای دو هنگامی بدون تراکم مقدماتی، پس از موفقیتی که موتور لنوار به‌دست آورد، ساخته شدند. از میان مشهورترین این موتورها، موتور اتمسفری دارای پیستون پرنده بود که آقایان اوتو و ا. لانگن[4] آلمانی آن را ساختند.

نیکلائوس اوگوست اوتو که یک آژانس مسافرتی داشت، پس از ساخت موتور لنوار از کار خود دست کشید تا وقت خود را وقف ساخت موتورهای درونسوز کند. در سال ۱۸۶۱ آزمایشهایی روی یک موتور لنوار انجام داد، آزمایشهایی که منجر به کاربرد اصل طرز کار چهار هنگامی با تراکم مقدماتی شد که دربارهٔ آن باز سخن خواهیم گفت. اما اوتو که بسرعت متوجه ارزش کشف خود نشده بود این میدان را در پایان سال ۱۸۶۲ ترک کرد و مطابق نمونه برسانتی و ماتئوتچی در سال

1. Forest 2. Kinsey 3. J.Hock 4. E.Langen

۱۸۶۳ نوعی موتور گازی ساخت که طبق اصل ماشینهای بخار اتمسفری کار می‌کرد. خنک شدن گازهای سوختی سبب کاهش فشار در سیلندر می‌شد و کار موتور نتیجهٔ پس زدن پیستون در اثر فشار جوّ بود.

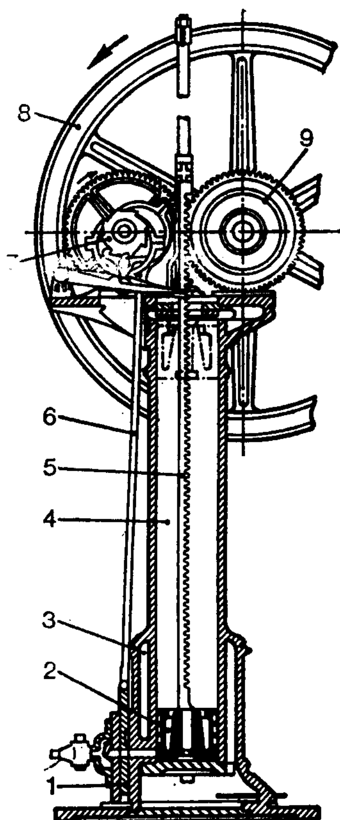
اوتو در سال ۱۸۶۴ با مهندس یوگن لانگن شریک شد. آنها پس از بررسی انواعی از موتورهای اتمسفری که تفاوت زیادی با یکدیگر داشتند به مدلی دست یافتند که آن را در نمایشگاه پاریس سال ۱۸۶۷ به نمایش گذاشتند و با استقبال فراوانی روبه‌رو شد. این موتور برای تولید یک اسب قدرت در هر ساعت، تنها ۸۰۰ لیتر می‌سوزانید درحالی‌که موتور لنوار ۲۵۰۰ لیتر. این صرفه‌جویی با پیشراندن دتانت گازهای سوخته شده، طی رفت سر بالای پیستون، تا پایین فشار جوّ به‌دست آمد. پیستون که با فشار جوّ به پایین رانده می‌شد با میلهٔ دنده‌دار دستهٔ خود، چرخدنده‌ای را می‌گرداند که با یک مکانیسم جغجغه‌ای روی محور حرکت‌دهنده سوار شده بود، این چرخدنده در هنگام نخست، خلاص می‌شد. گردش این محور را یک چرخ طیار نظم می‌داد. توزیع را کشو انجام می‌داد و اشتعال را یک شعله. موتور را یک پوشش آب خنک می‌کرد (شکل ۷۷).

کارگاه اوتو و شرکا، که از سال ۱۸۷۲ با نام .Gasmotoren Fabrik Deutz A.G خوانده می‌شد مدلها گوناگونی از ۰٫۵ تا ۳ اسب از این موتور را ساخت. این موتور برای همهٔ کارهایی که بین ۱۸۶۰ ـ ۱۸۷۶ ایجاد شدند با وجود سروصدای وحشتناک مربوط به‌کار پیستون پرنده و جغجغهٔ میل دنده بسیار مناسب بود. اما کار پرسروصدا و نامنظم، رونق آن را از بین برد و ماشین‌سازان نیز از ساخت آن چشم پوشیدند.

موتور اتمسفری دیگری در همان زمان بوسیلهٔ آقایان رایتمان[1] و آیمولر[2] ساخته‌شد که سالهای ۱۸۶۷ ـ ۱۸۷۳ در مونیخ در کارگاه مخترع خود کار می‌کرد. می‌بایست پیشگامان این آقایان را در ساخت موتورهای چهارهنگامی که در سال ۱۸۷۳ نمونه‌ای از آن را ساختند، نیز یادآور شد.

موتورهای «مختلط»: با ترکیب ماهرانهٔ شاتون بازگشتی یا پیستونهای متقابل در سیلندر، چند ماشین‌ساز توانستند از انبساط گازهای سوخته شده و فشار جوّ، برای تولید کار مفید بهره بگیرند. در نخستین نوع آنها، موتور بیشاپ[3] بسیار پرآوازه شد؛ حتی اکنون نیز چون نمونه‌هایی از آن در موزه‌های تکنیک نگاهداری می‌شوند، شناخته شده هستند. این موتور در سال ۱۸۷۰ ساخته شد. شاتون بازگشتی امکان می‌دهد که طی هنگام اول یک ضربه حرکت‌دهنده ـ مانند موتور لنوار ـ به‌دست آید و نیز ضربه حرکت‌دهندهٔ دیگری در نتیجه تأثیر فشار جوّ در جریان حرکت به پایین پیستون ایجاد شود (شکل ۷۸). در آن زمان بدرستی آن را موتور مختلط می‌نامیدند زیرا نوعی موتور

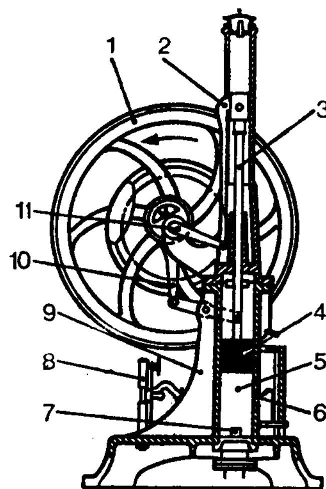
1. Ch.Reitmann 2. Aimüller 3. Bischopp



شکل ۷۷.موتور اتمسفری اوتو ـ لانگن (۱۸۶۷).
۱: کشوی توزیع؛ ۲: پیستون حرکت‌دهنده؛ ۳: سیستم خنک شدن با آب؛ ۴: سیلندر حرکت‌دهنده؛ ۵: میلهٔ دنده‌دار؛ ۶: میل فرمان کشوی توزیع؛ ۷: مکانیسم جغجغه‌ای؛ ۸: چرخ‌طیار؛ ۹: چرخدنده.

دوطرفه بود که مشخصات ویژهٔ خود را داشت. از امتیازات بزرگ آن بی‌نیازی به روغنکاری داخل سیلندر بود. احتمالاً این نخستین موتور دارای پره‌های بیرونی، برای خنک‌شدن با هوا می‌باشد. این موتور را آقایان مینیون[1] و رورار ساختند و ظاهراً مدت پانزده سال کار کرد. باید توجه داد بیشتر موتورهایی که از آنها به‌عنوان موتورهای با عمل مستقیم، یکطرفه، بدون تراکم قبلی سخن رفته است در نوشتارهای آن زمان تحت عنوان موتورهای مختلط از نوع بیشاپ آمده‌اند.

1. Mignon



شکل ۷۸.موتور «مختلط» بیشاپ (۱۸۷۲).
۱: چرخ‌طیار؛ ۲: شاتون؛ ۳: میلهٔ پیستون؛ ۴: پیستون؛ ۵: سیلندر؛ ۶: روزنهٔ اشتعال؛ ۷: روزنهٔ ورود سوخت و تخلیهٔ گازهای سوخته شده؛ ۸: شیر کنترل مقدار ورود گازهای سوختنی؛ ۹:ماهیچه‌های خنک‌کننده؛ ۱۰: میل فرمان کشوی توزیع؛ ۱۱: بازو.

پیستونهای متقابل در یک سیلندر را آقای گیلس[1] برای موتوری که در آلمان کارگاه Maschinen Austadt Humbolt ساخت در نظر گرفت و آقای ل. سایمون[2] آن را به سال ۱۸۷۵ در انگلستان ساخت. محفظهٔ احتراق بین دو پیستون قرارداشت که یکی، پیستون بالایی بود با طرز شبیه آنچه که در موتور اتمسفری اوتو وجود داشت؛ و دیگری پیستون پایینی بود که چرخهٔ دو هنگام با عمل مستقیم را، که در آن زمان معمول بود، همراه با کار یکطرفه انجام می‌داد.

همه موتورهایی که از آنها سخن گفته‌ایم، زمخت و نسبتاً با صرفه بودند و از یک تا سه اسب قدرت داشتند؛ گرچه قدرت بعضی از آنها تا ۱۲ اسب هم می‌رسید.

احتمالاً در پرتو همین موتورهاست که موتور گازی در سالهای ۶۰ در کارگاههای کوچک راه یافت. در این دوره تا اندازه‌ای شروع به معاوضه آنها با ماشینهای بخار شد. آنها این امتیاز را داشتند که بمحض نصب راه‌اندازی می‌شدند. این موتورها سوخت لازم برای تولید بخار را، در شروع کار و زمان توقف، پایین آوردند. حذف دیگ بخار، که دست‌وپاگیر و در بعضی از شهرهای بزرگ نصب

1. Gilles 2. L. Simon

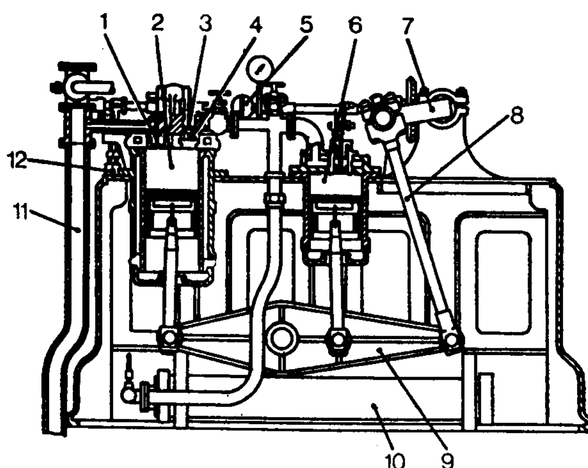
آن مستلزم کسب پروانه بود، موفقیتی محسوب می‌شد. این تجربه حاصل شد که ماشین بخار را نمی‌توان بدون جانشین دانست و از انرژی گرمایی مواد سوختنی با احتراق آنها در داخل سیلندر بهتر می‌توان استفاده کرد. همهٔ این موتورهای درونسوز، بدون تراکم مقدماتی تا سال ۱۸۹۰ در صنایع کوچک به‌کار گرفته می‌شدند. از آن پس موتورهای به‌اصطلاح با تراکم مقدماتی برای همیشه به‌جای آنها نشستند. کوشش در راه تکمیل این نوع موتور روی بهتر شدن بازده آن تمرکز یافت، بنابراین مصرف سوخت که در ابتدا یأس‌آور بود، پایین آمد. برای کوچک کردن حجم، افزایش قدرت و گسترش میدان کاربرد آن کوشش شد. برای دستیابی به هدف نخست به تراکم مخلوط گازها قبل از اشتعال آنها «تراکم قبلی» روی آوردند. و نیز بعداً در جریان تحول موتورهای درونسوز، افزایش میزان تراکم از هدف‌های ـ اگر نه مهمترین ـ مهم بود و آن را در تلاش برای بالا بردن بازده موتور عامل اصلی به‌حساب می‌آوردند.

مشکل تراکم قبلی: در ثبت اختراعات آقایان ویلیام بارنت و دوگران مسأله تراکم مقدماتی آمده است. اما این موتورها به‌طور صنعتی مورد استفاده قرار نگرفتند و نقش این تراکم در کار موتور در آن زمان فهمیده نشد.

چنین می‌نماید که اولین تکنسینی که بوضوح این کار را توصیه کرده، گوستاو اشمیت است. وی در سخنرانی خود به تاریخ ۱۸۱۶ در انستیتوی پلی‌تکنیک وین، برای بهتر شدن بازده موتور لنوار، توصیه کرد که مخلوط هوای سرد و گاز را بوسیلهٔ تلمبه‌هایی، پیش از آنکه وارد سیلندر شوند تا حدود سه اتمسفر متراکم سازند. این فکر را بدون شبهه برای نخستین بار آقای فرانسوا میلیون[1] فرانسوی مشخص و معین ساخت و آن را در سال ۱۸۶۱ در انگلستان به ثبت رسانید. موتوری که آقای میلیون طرح آن را ارائه می‌داد از نوع دو هنگامی بود، مخلوط گازی با دو تلمبه متراکم و با فشار وارد سیلندر می‌شد. اطلاعی در دست نیست که این موتور ساخته شد یا نه.

موتورهای بریتون: آقای بریتون، ماشین‌ساز امریکایی در سالهای ۱۸۷۲ ـ ۱۸۷۳ اختراعات متعددی را به ثبت رسانید و برپایهٔ آنها در سال ۱۸۷۳ موتوری ساخت که برای نخستین‌بار در نمایشگاه سال ۱۸۷۳ وین آن را به نمایش گذارد. این اولین موتوری بود که واقعاً با تراکم مقدماتی مخلوط گازها کار می‌کرد و آگاهانه برای بهتر کردن بازده به‌کار گرفته شده بود و به‌همین‌دلیل با اینکه یک موتور انفجاری نیست آن را در اینجا مورد بحث قرار می‌دهیم. این موتوری دوهنگامی بود که در هنگام نخست، مخلوط سوختی متراکم شده با یک تلمبه، وارد سیلندر می‌شد و طی مدت رفت یک چهارم اول حرکت پیستون تا زمان بسته شدن سوپاپ ورود گاز، با فشار ثابت می‌سوخت.

1. F.Million



شکل ۷۹.موتور بریتون (۱۸۷۳).
۱: سوپاپ خروج گازها؛ ۲: سیلندر حرکت؛ ۳: سوپاپ ورود سوخت؛ ۴: کاربوراتور؛ ۵: رگولاتور مرکزگریز؛ ۶: تلمبهٔ هوا؛ ۷:بازو؛ ۸: شاتون؛ ۹: شاهنگ؛ ۱۰: مخزن هوا؛ ۱۱: خروج گازها؛ ۱۲: تلمبهٔ سوخت.

بعداً این مخلوط در سه‌چهارم باقی‌ماندهٔ مسیر دست‌خوش دتانت می‌شد. در هنگام دوم، گازهای سوخته شده بیرون رانده می‌شدند.

نخستین موتور بریتون برای کارکردن با سوختهای گازی طرحریزی شده بود. این موتور تلمبه‌ای داشت که پیستون آن بوسیله شاهنگی که حرکت پیستون سیلندر را هم تأمین می‌کرد به‌کار می‌افتاد. این تلمبه، مخلوط هوا ـ گاز (۱۲ تا ۱۵٪ گاز) را تا ۵ اتمسفر متراکم می‌ساخت، سپس آن را در اواخر حرکتِ رو به پایین پیستون، وارد سیلندر می‌کرد.

اما این گاز پس از چند حادثهٔ انفجار کنار گذاشته شد و آقای بریتون موتور خود را برای مصرف بنزین دستکاری کرد. بنابراین وی نخستین کسی بود که فکر استفاده از سوخت مایع را مطرح ساخت (شکل ۷۹). تلمبهٔ دستگاه تنها هوا را تحت فشار قرار می‌داد و هوا در گذر خود، به‌هنگام ورود به سیلندر یا گاز بنزین آغشته می‌شد. کپسولی از ورق مشبک آهن که نمدی آغشته به مایع در آن بود سیلندر این موتور بود. تلمبه کوچک کمکی این «کاربوراتور» اولیه را تغذیه می‌کرد. این تفصیلات بعدها پدید آمدند. اشتعال مخلوط سوختی با شعله انجام می‌گرفت.

مشخصهٔ دیگری از موتور بریتون، طرز احتراق آن است که در فشار ثابت انجام می‌گیرد. حدود

بیست سال بعد این نوع احتراق، مشخصهٔ اصلی موتورهای دیزل شد. بدین‌ترتیب موتور بریتون را می‌توان سلف موتور دیزل دانست. بعدها در این‌باره سخن خواهیم گفت.

گرچه چند مؤسسه اجازهٔ ساخت آن را دریافت داشتند اما موتور بریتون عمر کوتاهی داشت. خود آقای بریتون در سال ۱۸۸۲ ساخت آن را رها کرد و دست به‌کار ساختن موتورهای چهار زمانه شد.

کارهای اولیه موتورهای چهار هنگامی: طی سالهای ۶۰ موتورهای گازی به واقعیتی تبدیل شدند و اصولی از طرز کار آنها به‌دست آمد. بااین‌حال، شرط اصلی بهتر شدن بازده، تراکم قبلی، هنوز درک نشده بود. همهٔ موتورها به‌طور دو زمانه کار می‌کردند، یعنی با رفتن و بازگشت پیستون در سیلندر، یک چرخه، کامل می‌شد.

براساس این دستاوردها، حرکت برای عملی کردن تراکم قبلی، راه بسیار پرپیچ و خمی را دنبال کرد. این امر نشان می‌دهد که همهٔ بررسیها را عملاً تجربه‌گران انجام داده‌اند و برای یافتن راه رسیدن به مقصد، هیچ‌گونه نظریه‌ای آنان را راهنمایی نمی‌کرد. آنان به سایقهٔ هوش تند و کارشناسی خود عمل می‌کردند و با کوشش و تحمل دشواریهای فراوان به راه‌حل رضایتبخشی دست یافتند.

این راه‌حل همانا موتور چهار هنگامی بود که عملی کردن تراکم قبلی را الزام‌آور می‌ساخت. موتورهای چهارزمانه با دوبار رفت‌وبرگشت پیستون در سیلندر ساخته شده‌اند که طی آن اجرای پیاپی ورود مخلوط گازی، تراکم آن، اشتعال و دتانت، تخلیهٔ گازهای سوخته شده وجود دارد. باید توجه داد که تجربه‌گران و از آن میان نیکلائوس آوگوست اوتو که نخستین سازنده چنین موتوری برای صنعت بود، این نتیجه را به‌دست آوردند که باید موتوری ساخت که از انواع قبلی بسیار متفاوت باشد درحالی‌که آنها می‌توانستند با دستکاری کمی ، موتور دوهنگامی را که با آن بسیار انس داشتند با منظور خود منطبق سازند. موتور دوهنگامی با تراکم قبلی، از موتورهای چهارهنگامی ـ با قلب اختراع اولیهٔ اوتو ـ نتیجه شده است.

اوتو و موتور چهارهنگامی: تکامل موتور اوتو هم با نوساناتی همراه بود. اوتو در همان آزمایشهای اولیهٔ خود در سال ۱۸۶۱ روی موتور کوچک لنوار، نه تنها به مشتعل ساختن مخلوط در پایان مسیر رفت، دست یافت بلکه توانست مخلوط سوختی را که جذب پیستون شده بود در مسیر دیگری (فشار) متراکم، و آن را تنها در پایان این مسیر منفجر سازد. راه پیشرفت به‌سوی چرخهٔ چهار هنگامی بدین‌ترتیب باز شده بود و آقای اوتو که از نتایج به‌دست آمده دلگرم شده بود در سال ۱۸۶۲ بوسیلهٔ مکانیسین میکائیل یوزف تسونس[1] موتوری ساخت که در نوشتارهای تخصصی به

1. M.J.Zons

نام «موتور چهارهنگامی آزمایشی اوتو ۱۸۶۲» معرفی شده است. از این ماشین تنها طرحی از سال ۱۸۸۵ در دست است که به‌مناسبت دادگاهی دربارهٔ حق امتیاز اوتو تهیه شده است.

این موتور گویا چهار سیلندر یکطرفه، دوبه‌دو مقابل هم، داشته است. اوتو بر آن بود که از چرخهٔ چهارهنگامی استفاده کند اما پیش‌بینیهای وی تأیید نشدند و موتور بزودی در اثر لرزشهایی که به‌هنگام کار داشت خرد شد. انفجار مخلوط سوختنی بسیار شدید بود و سیستم اشتعال نیز که پیستون آن را کنترل می‌کرد و نقطه اشتعال را بسیار تغییر می‌داد آن را شدت می‌بخشید. بدین‌ترتیب، اوتو این میدان را خالی کرد تا همان‌طورکه دیدیم، موتور اتمسفری بسازد.

نخستین موتور چهارهنگامی که می‌توانست کار کند، به توسط ساعت‌سازی آلمانی با نام مونیش کریستیان راتیمان در سال ۱۸۷۳ ساخته شد. این موتور مدت هشت سال در کارگاه وی برای راه انداختن ماشینهای کوچک مته و فرز فعال بود. موتور وی بدون نقشهٔ معین، به‌طور تجربی، با قطعات زیاد (سیلندر، کشو)ی که از موتور اتمسفری ساختهٔ آیمولر و خود وی در سال ۱۸۶۷ به‌جای مانده بود ساخته شد. این موتورگازی بود و توزیع‌کشویی داشت مجهز به سوپاپ و اشتعال با شعله بود. طی نخستین ثلث مسیر ورود سوخت، پیستون صرفاً هوا را، سپس در دوسوم باقی‌مانده، مخلوط را می‌مکید. این موتور با ۲۰۰ دور در دقیقه قدرتی برابر $\frac{۳}{۴}$ اسب داشت. سرعت آن با دست بوسیلهٔ شیر گاز تنظیم می‌شد.

موتور رایتمان تا زمان دادگاه پرسروصدای سال ۱۸۸۳، که مربوط به چرخهٔ چهارهنگامی بود، شهرتی نداشت.

با این‌همه، پس از موفقیتهای اولیه‌اش با موتور اتمسفری، اوتو از نو به مسألهٔ کاربرد تراکم مقدماتی، که احتمالاً آن را رها نکرده بود بازگشت. وی کوشید تا از مشاهدات سال ۱۸۶۲ استفاده کند و مدت ده سال درپی محدود کردن انتشار انفجار با نگهداری بخش ماندهٔ گازهای سوخته شده، طی مدت دتانت، در سیلندر بود. او کوشید تا دربارهٔ لایه‌بندی گازها در داخل سیلندر، از یک مخلوط غنی در نزدیکی نقطهٔ اشتعال تا یک گاز ناسوختنی در نزدیکی پیستون، نوعی تئوری سرهمبندی کند. بدین‌ترتیب، احتراق باید کند می‌شد و این امر نقص انفجار بسیار سریع را از بین می‌برد و حرکت منظم موتور را تأمین می‌کرد. هرچند این نظریه غلط بود اما ساخت موتور نوین با چرخه چهارهنگامی در اواخر سال ۱۸۷۵ یا اوایل ۱۸۷۶ به‌کمک فرانتس رینگس[1] تحقق پذیرفت. بنابراین، می‌توان گفت که از راه تجربه بود که اوتو به موتور چهارهنگامی رسید و ساخت آن هدف نخست وی نبود.

1. Franz Rings

در آغاز ماه مارس ۱۸۷۶ نخستین موتور اوتو برای آزمایش آماده بود. این موتور نیای همهٔ موتورهای درونسوز چهارهنگامی است. این موتور از نظر مکانیکی بدون عیب نبود و دلیل آن‌هم مدت بسیار کوتاهی بود که برای ساختن آن در نظر گرفته شده بود. این یک موتور افقی یکطرفه با شاتونی مفصلی بود که مستقیم روی مهرهٔ پیستون وصل می‌شد. ورود گاز و هوا بوسیلهٔ کشو انجام می‌گرفت و گازهای سوخته شده از راه سوپاپی بیرون رانده می‌شدند. هم کشو و هم سوپاپ را، محور توزیع، کنترل می‌کرد. اشتعال گازها با شعله متواتری که در کشو ایجاد می‌شد انجام می‌گرفت و یک شعلهٔ دائم مطابق سیستم بارنت آن را منظماً از نو مشتعل می‌ساخت. این موتور با آب خنک می‌شد. گاز و هوا بین دو تا سه اتمسفر فشرده می‌شدند و حداکثر فشار حدود ۱۰ اتمسفر بود. قطر سیلندر ۱۶۱ میلیمتر و طول رفت پیستون ۳۰۰ میلیمتر بود. قدرت موتور سه اسب با ۱۸۰ دور در دقیقه و مقدار مصرف آن در هر ساعت برای هر اسب ۹۵۰ کیلوگرم بود. تنظیم این موتور با دست بوسیلهٔ شیری انجام می‌گرفت که مقدار گاز وارد به سیلندر را کنترل می‌کرد.

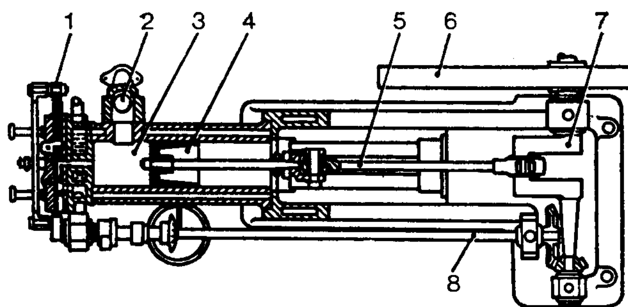
موتور اول اوتو بزودی از لحاظ مکانیکی بوسیله ویلهلم مایباخ[1] طبق مدل یک ماشین بخار افقی روز، اصلاح شد (شکل ۸۰). شاتون مفصلی که مستقیم به پیستون وصل می‌شد جای خود را به میله‌ای دارای سر غلنبه و ناودانی داد. تنظیم کار ماشین به‌طور خودکار با استفاده از رگولاتور وات انجام می‌گرفت. نتایج کار بسیار دلگرم‌کننده بود. مصرف گاز این مدل جدید تقریباً برابر مقدار مصرف موتور اتمسفری اوتو ـ لانگن سال ۱۸۷۶ شد که با صرفه‌ترین موتور بود؛ اما سروصدای بسیار کمتری داشت. کار آن منظم و حجم آن بسیار کمتر و بازده آن بیشتر بود.

آقای اوتو در پنجم ژوئن ۱۸۷۶ تقاضای ثبت اختراع خود را کرد، اما از آنجا که ثبت اختراع تا ۲۵ ماه مه سال ۱۸۷۷ در آلمان وجود نداشت، امتیاز اوتو در تاریخ چهارم اوت ۱۸۷۷ به ثبت رسید. این کار سبب شد که انحصار موتور چهارهنگامی برای مدت پانزده سال، تا ۱۸۹۱ در دست مؤسسه دویتس باقی بماند و این امتیاز چند سال بعد انگیزهٔ دادگاههایی شد که تاریخی ماندند.

چرخه نظری بو دو روشا دربارهٔ موتور چهارهنگامی: در حقیقت در سال ۱۸۶۲ بود که یک مهندس فرانسوی راه‌آهن به نام آنفونس بو دو روشا رساله‌ای با عنوان: *Nouvelles recherches sur les conditions pratiques de l'utilisation de la chaleur et en général de la force motrice* منتشر کرد که طی آن در ضمن ارائه راه‌حلهای دیگری از کاربرد بهتر گرما در موتورهای حرارتی، برای یافتن بهترین شرایط کاری موتورهای درونسوز نیز پیشنهادهایی داد.

او علتهای اتلاف حرارتی از طریق جدار و خروج گازها را تشخیص داد و برای کاهش آنها

1. W. Maybach



شکل ۸۰.موتور چهارهنگامی اوتو (۱۸۷۶).
۱. کشوی ورود سوخت و اشتعال؛ ۲. سوپاپ تخلیه؛ ۳. سیلندر؛ ۴.پیستون؛ ۵. شاتون؛ ۶. چرخ طیار؛ ۷. محور حرکت‌دهنده؛ ۸. میل فرمان کشوی توزیع.

راه‌حلهایی پیشنهاد کرد. یکی از این راه‌حلها که مربوط به اتلاف گرما در اثر خروج گاز است ایجاد مرحلهٔ دتانتی هرچه طولانیتر را پیشنهاد می‌کند. او با استدلال منطقی بدین نتیجه می‌رسد که چنانچه بخواهند مقدار فشار را در پایان رفت حرکت‌دهنده تا حد ممکن پایین آورند، همین نتیجه را می‌توان با بالا بردن هرچه بیشتر فشار در آغاز همین حرکت به‌دست آورد. وی همچنین توصیه می‌کند که مقدار فشار در آغاز این حرکت، حتی تا ۵/۵ـ۶/۵ اتمسفر بالا رود، مقادیری که از نظر وی، اشتعال خودبه‌خودی را سبب می‌شود. آقای بو دو روشا بدین طریق به مفهوم کار موتور با تراکم قبلی دست یافت و آن را ابتدا: «دتانت گرمایی که پس از تراکم سرمایی به‌دست می‌آید» نامید. اما وی نه‌تنها طرز کار موتورهای درونسوز با تراکم قبلی را پایه گذارد، بلکه همچنین وسیلهٔ تحقق آن: چرخهٔ چهارهنگامی را پیشنهاد کرد: «دراین‌صورت و برای یک جانب سیلندر، طبیعتاً به اجرای عملیات زیر در دوره‌ای از چهار مرحلهٔ پشت سر هم راهنمایی شدند:

« °۱، تنفس، طی یک رفت کامل پیستون»

« °۲، تراکم، طی مرحلهٔ بعدی»

« °۳، اشتعال در نقطهٔ مرگ و دتانت طی مرحلهٔ سوم»

« °۴، بیرون راندن گازهای سوخته شده در مرحلهٔ چهارم و بازگشت پایانی.»

متأسفانه آقای بو دو روشا که با مجتمع روار رفت‌وآمد داشت شخصیتی گمنام بود و احتمال زیاد دارد که اشخاصی که با وی ملاقات می‌کردند او را شخصی تخیلی می‌انگاشتند و رسالهٔ وی

را بدون شک هیچ‌کسی که می‌توانست از آن سودی ببرد نخواند. بخصوص او می‌توانست اوتو را از ۱۵ سال تجربیات کورکورانه معاف سازد، زیرا می‌توانست اهمیت راه‌حلی را که از کنار آن گذشته بود به وی نشان دهد. اما خود بود دو روشا تنها به تئوری می‌پرداخت و هرگز به کمترین کار عملی علاقه‌مند نبود.

با این‌همه، رسالهٔ وی در نقطه مقابل اختراع اوتو بود زیرا اوتو به‌عنوان مثال نشان داده بود که چرخهٔ چهارهنگامی آیندهٔ احتراق درونی را تجدید کرده است.

مرحلهٔ گسترش: نمایشگاه جهانی پاریس در ۱۸۷۸ ویژهٔ موفقیتهای موتورهای چهارهنگامی بود. پروانهٔ ساخت این موتور را انگلیسیان، فرانسویان و امریکاییها به‌دست آوردند، و ساخت آن بسرعت گسترش یافت. نمونه‌ای که مایباخ ساخت یک سیلندر افقی داشت و نخستین اقتباس از آن بود. قدرت این موتورها از $\frac{۱}{۲}$ تا ۳ اسب متغیر بود. بعدها در سال ۱۸۸۰ موتورهایی با ۱۵ تا ۲۰ اسب ساخته شد و با بزرگتر شدن ابعاد موتور، در سال ۱۸۸۹ موتوری با قدرت ۱۰۰ اسب ساخته شد. بدین‌ترتیب عصر موتورهای گازی پرقدرت آغاز شد.

در همان‌حال، راه‌حلهای دیگری مورد بررسی قرار گرفتند و به مرحلهٔ ساخت رسیدند. در سال ۱۸۷۹ دویتس تعدادی موتورهای دو سیلندری ساخت که در آنها دسته‌های پیستون به میل‌لنگ یک محور متصل بودند.

موتورهای دو سیلندری بسیار قویتر از موتورهای تک سیلندری بودند، کار آنها چنان منظم بود که در کارخانه‌ها بهتر از مولدهای الکتریکی، که گسترش آنها هم شروع شده بود، به‌کار می‌آمدند.

بر پایهٔ اندیشه‌ای از گوتلیب دایملر که در آن زمان در دویتس کار می‌کرد برای ساختن یک موتور مختلط، با الهام از ماشینهای بخار دو انبساطی آزمایشهایی به عمل آمد. این اقدام را چند تکنسین نیز دنبال کردند، و فرنان فوره مدت زیادی دنبال نشد.

رقبای اوتو از سال ۱۸۸۲ امتیازات وی را مورد تعرض قرار دادند. به همین مناسبت پیشگامانی نظیر میلیون، دوگران، رایتمان، بو دو روشا و دیگرانی که احتمالاً مدتها گمنام بودند شناخته شدند. در ژانویه ۱۸۸۶ دادگاهی اوتو را از امتیازاتش دربارهٔ موتورهای چهارهنگامی در همهٔ کشورها، جز انگلستان محروم ساخت. این تصمیم، هیچ‌یک از صلاحیتهای اوتو ـ را که بدون اطلاع از کارهای پیشینیان، که دربرابر او قرار می‌دادند، موفق شده بود ـ نمی‌توانست منکر شود.

حتی پیش از آنکه قضاوت به‌عمل آید، موتورهای دیگری از نوع چهارهنگامی، بویژه در فرانسه، ساخته شدند. آقای لنوار بوسیلهٔ مینیون و روار در سال ۱۸۸۳ یک موتور افقی با توزیع بوسیله

سوپاپهای مکانیکی ساخت که بسیار با صرفه بود: ۶۰۰ لیتر برای هر اسب در ساعت. اکثر راه‌حلهایی که برای موتور سال ۱۸۶۰ به‌کار گرفته شدند بوسیلهٔ این شخص اقتباس شدند: رگولاتور وات، اشتعال الکتریکی و خنک شدن با آب. این موتور لنوار که بعداً با دو و سپس با چهار سیلندر ساخته شد، به جایی رسید که با بنزین کار می‌کرد.

نوآوری دیگری که می‌توان آن را از نظر سادگی و عملی بودن، پیشرفتی به‌شمار آورد، در همان زمان با نام موتور *Simplex* به بازار آمد. طراحان این موتور آقایان دلامار_ دبوت ویل و شارل مالاندن[1] و سازندهٔ آن تامس پاول اهل روان بود. این‌هم موتوری افقی و تک سیلندری بود که ورود سوخت در سیلندر بوسیله کشویی انجام می‌گرفت که اشتعال هم در آن با یک جرقهٔ الکتریکی ایجاد می‌شد؛ فرارگاز از یک سوپاپ بود. موتور *Simplex* در زمان خود نقشی ایفا کرد و کسانی‌که آزمایشهای اولیهٔ ساخت اتومبیل را انجام می‌دادند با آن کار می‌کردند، و نیز قدرت آن به‌عنوان موتور صنعتی در سال ۱۸۸۹ به ۱۰۰ اسب رسید.

همین‌که به بطلان امتیاز اوتو رأی داده شد، نوع موتورهای چهارهنگامی بسرعت رواج گرفت. این رواج به‌حساب کنارگذاشتن موتورهای دوهنگامی با یا بدون تراکم قبلی در مرحلهٔ پیش بود که هنوز طرفدارانی داشت. این نکته جالب است که زیاده‌روی در این راه بدانجا کشید که موتورهای شش هنگامی پیشنهاد شدند و اولین آنها را گریفین انگلیسی در ۱۸۸۳ ساخت. دو هنگام آخر این موتور برای روبیدن تکمیلی هوای آزاد سیلندر بود. این پیشنهاد با پیشنهاد اوتو که ده سال پیش ارائه شده بود مقابل شد و چنانکه دیدیم، مربوط به تنظیم فرارگاز برای حفظ بخش باقی مانده گازهای سوخته سیلندر بود. راه‌حلهای مکانیکی با کنترل شدن شدت انفجار بهبود یافتند؛ اما بازده این سیستم یأس‌آور بود و بزودی کنار گذاشته شد.

اصلاحات گوناگون: یکی از نخستین اصلاحاتی که انجام گرفت عمودی قرار دادن سیلندرها بود. در آلمان، برادران کورتینگ[2]، آدم و شرکت بوس_ زومبارت[3] و شرکا نوعی موتورهای عمودی ساختند که محور اصلی (یا راه‌انداز) در بالای سیلندرها قرار داشت. در همگی این موتورها عمل توزیع با سوپاپهایی انجام می‌گرفت و اشتعال آنها با شعله. در انگلستان برادران کراسلی[4] همین سیستم را پذیرفتند اما اشتعال با لامپ ملتهب انجام می‌گرفت. در فرانسه، شرکت پاریسی گاز از اشتعال الکتریکی استفاده می‌کرد.

طرز قرارگرفتن محور اصلی (راه‌انداز) در زیر سیلندرها، به‌شکل ماشینهای هاونی بخار را در

1. Ch. Malandin 2. Körting 3. Buss-Sombart 4. Crossley

سال ۱۸۸۸ آقای فرنان فوره در فرانسه پذیرفت و آقای بورس لوتزکی[1] مهندس روسی در آلمان.

سیستم پیستونهای متقابل در سیلندر که در آن زمان ویژهٔ موتورهای دوهنگامی بدون تراکم قبلی بود در سال ۱۸۷۵ بوسیلهٔ فردیناند کیندرمان آلمانی برای موتوری از نوع چهارهنگامی به‌کار گرفته شد. در انگلستان آقای ویلیام دکسفورد[2] و پسران آتکینسون[3] در ۱۸۸۱ پیستونهای متقابل را برای موتورهای چهارهنگامی به ثبت رسانیدند. آقای فوره در سال ۱۸۸۵ همین سیستم را با چندین راه‌حل سینماتیک برای انتقال حرکت از پیستونها، که در جهات مخالف جابه‌جا می‌شدند، به‌کار گرفت: تجهیز با شاتون جفتی بیرونی در ۱۸۸۵، فرمان مستقیم یکی از پیستونها و فرمان با بازوهای بیرونی پیستون در ۱۸۸۶، میل‌لنگ تکی با دو دسته (یا زبانه) و کنترل پیستون با اهرم نوساندار در ۱۸۸۷. فوره در واقع بدون اینکه چیز تازه‌ای اختراع کرده باشد نامش در ردیف مخترعان بسیار فعال فهرست شده است.

با تمام این احوال، کاربرد پیستونهای متقابل پیگیری نشد؛ اما چون تعادل کاملی بر آن حکومت می‌کرد بعدها برای موتورهای دوهنگامی که شامل بعضی موتورهای گازی بسیار قدرتمند می‌شدند و پس از سال ۱۹۳۰ برای موتورهای دیزل از نو به‌کار برده شد.

دوطرفه ساختن هم موضوع آزمایشهای فراوانی در انگلستان بوسیلهٔ گریفین روی موتور شش هنگامی در ۱۸۸۶، سپس در سال پس از آن در فرانسه بوسیلهٔ لوتونب[4] روی موتور چهارهنگامی بود. اما دو طرفه کار کردن موتور مدتی بعد، روی موتورهای گازی قدرتمند و پس از آن روی موتور دیزل پذیرفته شد.

دربارهٔ طرز توزیع، شاهد سوپاپهایی بودند که شانه‌به‌شانهٔ کشو رواج می‌یافتند. زمانی‌که سرعت کار شروع به افزایش کرد سوپاپهای تنفسی و خروج گاز ناگزیر هر دو خودکار شدند.

سیستمهای گوناگون اشتغال نیز، به‌طوری‌که دیدیم، به‌کار گرفته شدند. پس از سال ۱۸۸۶ در روش اشتعال با شعله اصلاحی وارد شد و آن استفاده از لامپ برقی در محل ورود گاز به‌جای سیستم کشویی بود. نخستین لامپ اشتعال را آقای کورتینگ آلمانی طرح کرد. اشتعال بوسیلهٔ لامپ ملتهب چنین بود که مخلوط سوختی در پایان مرحلهٔ تراکم، با واسطهٔ توزیعی که از لامپ واقع در بالای سیلندر فرمان می‌گیرد با آن برخورد می‌کند. در سال ۱۸۸۳ دایملر این سیستم را کنار گذاشت و لامپ ملتهب را در تماس دائم با داخل سیلندر قرار داد. اصلاحات اخیر مربوط به افزایش یافتن سرعت موتورها نیز می‌شد.

روش گذشته خنک‌سازی با آب این عیب را داشت که مصرف آب آن زیاد: ۳۰ تا ۴۰ لیتر

1. B. Loutzky 2. W. Dexford 3. Atkinson 4. Letombe

در هر ساعت برای هر اسب بود. اما این روش از این پس با جریان دادن آب در چرخهٔ بسته‌ای انجام گرفت.

در موتورهای دو سیلندری و ندرتاً چهار سیلندری که ابعاد و قدرت آنها، بسرعت طی ده سال، فزونی بسیار یافت، راه‌اندازی آنها با دشواریهایی روبه‌رو بود. راه‌اندازی آنها با گردانیدن جرم لخت با دست انجام می‌گرفت. اوتو برای سبک کردن این کار وسیله‌ای اندیشید که حذف تراکم را تا نخستین اشتعال ممکن می‌ساخت. اما این راه‌حل برای موتورهای با قدرت کمی بیشتر مناسب نبود. آقای دوگلد کلرک در سال ۱۸۸۳ وسیله‌ای برای نگهداری گازهای متراکم در دور آخر موتور در لحظهٔ توقف را در یک مخزن کمکی یافت. از این گازهای تحت فشار برای راندن پیستون در راه‌اندازی بعدی استفاده شد. در این راه‌حل، کاربرد پرهزینهٔ یک موتورکوچک کمکی حذف می‌شد اما نگهداری مخلوط متراکم شده خطر انفجار را به همراه داشت. بدین‌ترتیب، یک تلمبهٔ کوچک دستی را برای ایجاد این تراکم در لحظهٔ راه‌اندازی، مورد استفاده قرار دادند.

برای بالا بردن بازده موتور با تمدید دتانت گازهای سوخته شده در سیلندر، آزمایشهایی به‌عمل آمد. آقای شارون[1] وسیله‌ای را مورد استفاده قرار داد که گازهای سوخته شده را از نو وارد چرخه می‌کرد و در چرخهٔ بعدی از آن کار می‌کشید، و آقای آتکینسون کوشید تا بوسیلهٔ تنظیم شاتونها، طولهای دتانت دوگانهٔ مرحلهٔ تراکم، بازده را بالا برد. چرخه‌های دتانت مدید در این زمان مدنظر بودند گر چه فایدهٔ آنها در زمانی بسیار بعد، آن‌هم برای موتورهای با سوخت‌رسانی زیاد بوسیلهٔ کمپرسورهای توربینی یا برای گروه موتورهای پیستونی با توربین گازی واکنشی آشکار شد.

در پایان یادآوری می‌کنیم که در این دوره گازسازهایی برای گاز پست و گاز آب رواج یافته بودند (رجوع کنید به صفحهٔ ۶۲۲)؛ این وضع طبیعتاً عامل مهمی برای پیشرفت موتورهای گازی بود. توزیع گاز شهر، دیگر لزومی نداشت زیرا مؤسسات صنعتی می‌توانستند با هزینهٔ کمی گازسازهایی در اختیار داشته باشند. چنین می‌نماید که در مؤسسه برادران کراسلی بود که برای نخستین بار در سال ۱۸۸۴ از گاز گازساز برای تغذیه موتورهای خود استفاده شد.

موتور دوهنگامی: موتورهای دوهنگامی پس از آنکه اختراع اوتو مزایای آنها را آشکار ساخت همراه با تراکم قبلی ساخته شدند. وانگهی این موتورها تغییر این اختراع را هم ممکن ساختند. این موتورها که پس از لغو امتیاز اوتو رها شده بودند بعداً به‌علت بعضی برتریهایی که نسبت به چرخه چهارهنگامی داشتند: افزایش قدرت با ظرفیت برابر سیلندر، نظم زیادتر درکار، استحکام و سادگی در ساختمان و . . . از نو مورد توجه قرار گرفتند.

1. Charon

دیده شد که میلیون و بریتون در آن زمان برای متراکم ساختن گازها پیش از آنکه وارد سیلندر شوند، از تلمبه‌هایی استفاده می‌کردند و بارنت و دوگران بدون اینکه از این کار سودی برگیرند این تراکم را در سیلندر انجام می‌دادند.

آقای کلرک مهندس انگلیسی در سال ۱۸۷۷، یعنی بلافاصله پس از پیدایش موتور اوتو، شروع به تغییر دادن چرخهٔ چهارهنگامی به دوهنگامی کرد و برای این کار تراکم قبلی در داخل سیلندر را اجرا کرد. وی چندین موتور را طرح کرد که مؤسسه استرن و شرکا[1] در گلاسگو آنها را ساختند. ورود سوخت بوسیلهٔ یک سوپاپ به‌کمک تلمبه در حدود لحظه‌ای که پیستون در پایان حرکت دتانت بود انجام می‌گرفت. این تلمبه تنها برای وارد کردن مخلوط سوختی کارگذاشته شده بود اما همین‌که این مخلوط را کمی متراکم می‌ساخت به تخلیهٔ گازهای سوخته شده یا روبیدن آنها کمک می‌کرد. کار خروج گازها از سوراخهایی انجام می‌گرفت که پیستون در $\frac{۸}{۱۰}$ مسیر خود آنها را باز نگاه می‌داشت و در حرکت برگشت هم تا مدتی باز نگاهداشته می‌شدند. ورود و خروج مخلوط سوختی عملاً روی هم قرار داشتند. سوراخهای فرار گاز، کمی زودتر باز می‌شدند و سوپاپ ورود گاز، کمی بیشتر باز می‌ماند. تراکم در جریان برگشت و پس از بسته شدن سوراخها انجام می‌گرفت. اشتعال به واسطه شعله‌ای که در یک کشو بود تأمین می‌شد و خنک شدن در اثر جریان آب. سیستم جالبی از روغنکاری قطره‌قطره به‌کمک روغندان پیستونی را آقای کلرک طرح کرده بود. کار موتور که با قدرت ۴ اسب و ۳۰۰ دور در دقیقه بود با یک رگولاتور مرکزگریز کنترل می‌شد. با این‌همه، تخلیهٔ گازهای سوخته شده ناکامل باقی مانده بود و نوعی تخلیهٔ پیش از وقت بخشی از سوخت تازه، سبب اتلاف سوخت می‌شد. برای رفع این نواقص که ذاتی این موتور بود، کلرک کوششهایی به‌عمل آورد و آن اینکه نخست هوای تنها را وارد کرد که نقش نوعی میانگیر بین گازهای سوخته شده و سوخت تازه ایفا می‌کرد ـ ولی وی در این کار آشکارا ناموفق بود.

مهندس دیگری از انگلستان با نام ج. رابسن[2] در سال ۱۸۷۹ به راه‌حل دیگری دست یافت. وی موتوری طرح کرد که بوسیله تنگیز[3] نامی ساخته شد. این موتور دوهنگامی و دوطرفه بود که در آن بخشی از سیلندر نقش تلمبه را داشت. این تلمبه مخلوط سوخت را وارد مخزنی می‌کرد که از آنجا به بخش حرکت‌دهندهٔ سیلندر مکیده می‌شد.

این طرح را آقای ج. فیلدینگ در سال ۱۸۸۰ تکمیل کرد؛ وی نخستین موتوری را ساخت که از کارتر بسته شده به‌عنوان تلمبه سوخترسان و روبیدن گازهای سوخته شده استفاده می‌شد: موتور فیلدینگ فاقد مخزن بود و مخلوط سوخت مستقیماً از کارتر وارد سیلندر می‌شد. در این موتور،

1. Sterne & Co 2. J. Robson 3. Tangyes

تخلیه از راه سوپاپی انجام می‌گرفت که در سر سیلندر قرار داشت، و ورود سوخت از راه سوراخهایی که بوسیلهٔ خود پیستون باز و بسته می‌شدند.

اندیشهٔ کاربرد بخشی از سیلندر به‌عنوان تلمبهٔ سوخترسان و روبش گازهای سوخته شده، بوسیلهٔ یک نفر آلمانی با نام کونراد انگله[1] در سال ۸۷۸۱ نیز مورد بررسی قرارگرفت. اختراع وی الهام‌بخش آقای مایباخ در ساخت موتور *Standuhr* در سال ۱۸۸۴ بود.

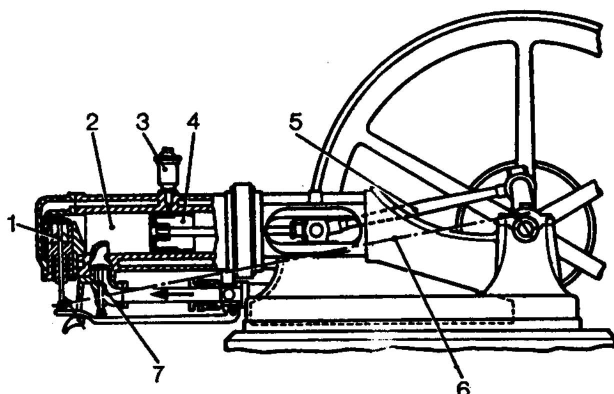
قدیمیترین موتور دوهنگامی آلمان در ۱۸۸۰ بوسیلهٔ مؤسسه‌ای در لیندن[2] به نام Hannoversche Maschinenbau - AG بر پایهٔ طرحهای ویتینگ[3] و هیس[4] ساخته شد. این موتور شبیه موتورکلرک بود اما، برخلاف همهٔ موتورهای پیش از خود، قائم بود و مخلوط سوخت آن کمی دیرتر در تلمبه فشرده می‌شد. مؤسسات دیگر آلمانی، بویژه: Korting_Lieckfeld و Buss_Sombart نیز موتورهای بسیار مشابهی ساختند. موتوری که در سال ۱۸۸۳ بوسیلهٔ کارل بنز[5] ساخته شد. (شکل ۸۱) حدود ده سال پرفروش بود. این موتور دو تلمبه داشت: یک تلمبهٔ هوا که شامل کارتری بسته بود و یک تلمبهٔ گاز که موتور آن را فعال می‌ساخت. هوای فشرده طی نیمهٔ نخست مسیر وارد سیلندر می‌شد و گاز روشنایی حدود میانهٔ مسیر.

در مورد توزیع سوخت، راه‌حلهای تازه‌ای را مؤسسه انگلیسی Day & Sons در سال ۱۸۸۹ پیشنهاد کرد که تنها سوراخهای موجود در جدار سیلندر را که بوسیله پیستون باز و بسته می‌شدند پذیرفته بود. کارتر بسته، هم به‌عنوان تلمبهٔ فشار و هم به‌عنوان روبندهٔ گازها عمل می‌کرد. این همان مدلی است که بعدها بر روی موتورهای با سوخت مایع، تکمیل شد.

گرچه موتور دوهنگامی با تراکم قبلی در فرانسه: بوسیلهٔ راول و بنیه و در امریکا نیز بوسیلهٔ ناش و گرت[6] ساخته می‌شد، به دلایلی که بعدها خواهیم گفت گسترش آن در این زمان بسیار محدود ماند. موتور دیزل بود که بعدها پیشرفت این چرخه را، بویژه برای قدرتهای زیاد تأمین کرد، و در این زمینه حقیقتاً انحصاری شد. این موتور تنها در سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۳۰ آن‌هم به‌عنوان موتور بنزینی مجدداً وارد میدان شد که از رواج آن در آن زمان همگان اطلاع دارند.

موتورهای پرقدرت: به‌کارگیری موتورهای بنزینی، که از آنها سخن راندیم، سبب رکورد سریع موتورهای گاز شد. با این‌همه، از میان این موتورها، واحدهای با قدرت زیاد، از پایان سالهای ۸۰ کاربرد مدیدی یافتند. استفاده از گازهای کوره‌های بلند و سپس گازهای پست به‌عنوان سوخت، که از منابع انرژی صنعتی با صرفه‌ای بودند تا رواج موتورهای دیزل ادامه داشت.

1. K. Angele 2. Linden 3. Witting 4. Hees 5. K. Benz 6. Garrette



شکل ۸۱.موتور دوهنگامی بنز (۱۸۸۳).
۱. سوپاپ تخلیه؛ ۲. سیلندر حرکت؛ ۳. سیستم روغنکاری؛ ۴. پیستون؛ ۵. شاتون؛ ۶. اهرم فرمان سوپاپ تخلیه ؛ ۷. سوپاپ ورود هوا.
تلمبهٔ احتراق و سوپاپ ورود سوخت و نیز مکانیزم اشتعال نمایان نیستند.

موتورهای پرقدرت نخستین از سال ۱۸۸۸ در فرانسه بوسیله مؤسسات دلامار- دبوت ویل و لوتونب، در آلمان بوسیلهٔ مؤسسات اُکلهویزر[1] و یونکرس، سپس بوسیله کورتینگ دویتس، در بلژیک بوسیله کاکریل و غیره ساخته می‌شدند. آنها به‌شکل موتورهای دوهنگامی، چهارهنگامی، یکطرفه و دوطرفه بودند. این موتورهای بسیار محکم در سال ۱۹۰۰ به بازده‌های حرارتی بسیار بالایی؛ ۲۵-۲۷٪ دست یافتند. در سال ۱۹۲۴ مؤسسه MAN از این موتورها با قدرت ۴۴۰۰ اسب و مؤسسه لوکروزو و در ۱۹۳۰ موتورهای با قدرت ۸۵۰۰ اسب ساخت و از آن پس مخصوص سیدرورژی (آهنکاری) شدند.

موتورهای بنزینی

پیش از سال ۱۸۶۰، تاریخ نخستین موفقیت لنوار، کاربرد بخشهای سبک نفت به عنوان سوخت موتورها بررسی می‌شد. بنزین نفت در پرتو تبخیر می‌توانست آسان جایگزین گاز شود. برخی از تجربه‌گران، از جمله رابرت استریت پیش از سال ۱۸۶۰ و بعدها ماشین‌سازانی نظیر لنوار، مایباخ، هوک در این راه گامهایی برداشتند. اما ساخت موتور چهارهنگامی اوتو اذهان را متوجه کاربرد

1. Oechelhaüser

عمومی تراکم قبلی ساخت.

اما موتورهای گازسوز نمی‌توانستند جابه‌جا شوند و بنابراین آن آرزوی حرکت دادن مکانیکی وسایل راهپیما بود که انگیزهٔ کارهای اولیه برای استفاده از بنزین شد- کاری که بدون اصلاحات بنیادی در موتورهای گاز سوز هم عملی بود.

دربارهٔ اینکه کدام موتور «انفجاری» با سوخت مایع کارکرده است، نمی‌توان با اطمینان سخن گفت. این افتخار گویا نصیب یک موتور تک سیلندری دوهنگامی می‌شود که آقای فرنان فوره در سال ۱۸۸۰ ساخته است. در همین سال در آلمان نیز مؤسسه Hannoversche Maschinenbau-AG یکی از موتورهای دوهنگامی گازسوز خود را که آقایان ویتینگ و هیس طراحی کرده بودند با بنزین راه انداخت (شکل ۸۲)، مخلوط سوختی، پس از سوپاپ ورود، با گرد شدن بنزین در جریان هوای جذب شده تشکیل می‌شد، کمی بعد آقای لنوار از یک‌سوی و دلامار- دبوت ویل از سوی دیگر همین کارها را روی موتورهای خود انجام دادند.

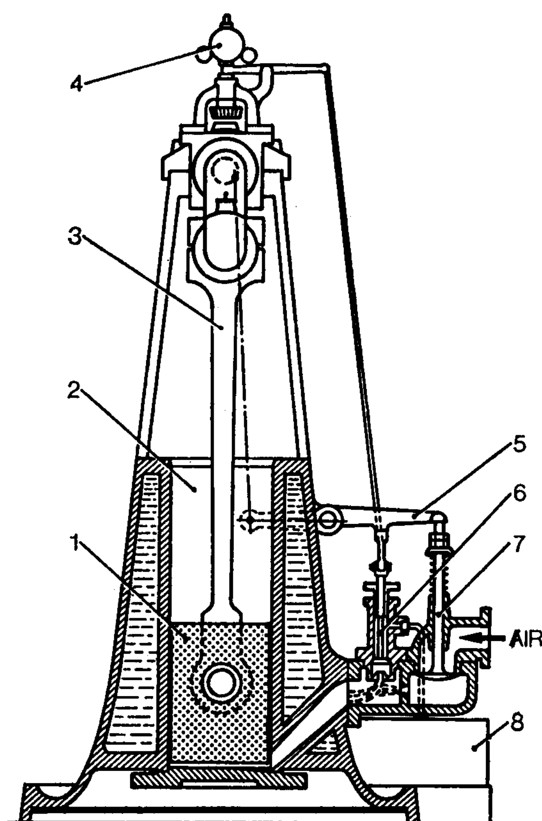
یکی از نخستین موتورهایی که برای سوخت بنزینی طراحی شده بود و فقط بنزین مصرف می‌کرد در سال ۱۸۸۴ بوسیلهٔ یوهانس اشپیل[1] ساخته شد. این موتور از نوع افقی چهارهنگامی بود؛ توزیع آن بوسیلهٔ سوپاپها و اشتعال در آن با شعله و به‌کمک کشوی اشتعال انجام می‌گرفت. بنزین از مخزن بنزین بوسیلهٔ یک تلمبهٔ کوچک به محفظهٔ کوچکی که سوپاپ ورود سوخت در آن بود فرستاده می‌شد. در آنجا بنزین تبخیر و در هوایی که در مدت ورود آن مکیده شده بود به‌شکل گرد درمی‌آمد، مخلوط سوختی تشکیل شده به سیلندر راه می‌یافت.

در سال ۱۸۸۵ موتورهای بنزینی، بویژه به هدف تحقق حرکت مکانیکی خودروها تکامل داده شدند. این تکامل با راه‌اندازی دو عنصر اساسی کاربوراتور و سیستم اشتعال مشخص می‌شود. در این زمان سیستم اشتعال را «مشکل مشکلات» به‌شمار می‌آوردند.

کاربوراتورها: تولید مخلوط سوختی با سوختهای مایع مشکلی بود که موتورهای گازسوز آن را حل نکردند. در مورد خود بنزین، ماشین‌سازان کوشیدند تا برای حل آن، نخست روش موتورهای گازسوز را اصلاح کنند (اشپیل، ویتینگ، هیس) و به‌طور ساده بنزین را در جریان هوایی که در سیلندر مکیده شده بود قرار دهند. اما گردی که بدین‌ترتیب ایجاد می‌شد مخلوط همگنی نبود و، بنابراین می‌بایست درپی یافتن وسیلهٔ مخصوصی، کاربوراتور، و بعدها تزریق بنزین باشند.

کاربوراتورهایی که برای نخستین بار طراحی شدند در اساس، بدنهٔ مشبکی آغشته به بنزین یا نفت بود که، هوایی که مکیده و وارد سیلندر می‌شد از آن عبور می‌کرد. این وسیله را، کاربوراتورهای

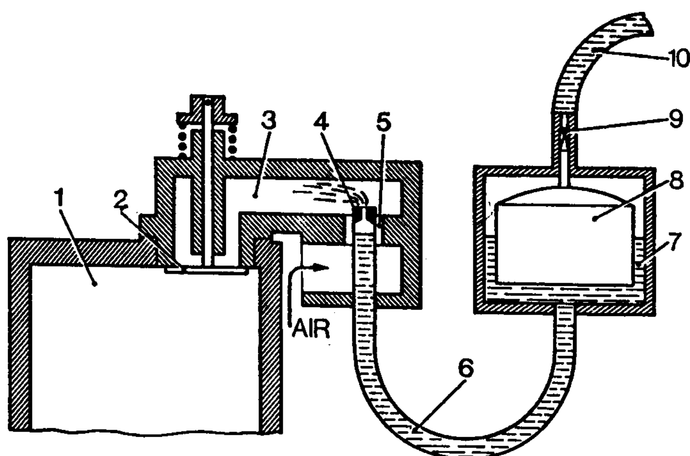
1. Johannes Spiel



شکل ۸۲.موتور دوهنگامی Hannoversche Maschinenbau-AG (۱۸۸۰).
۱. پیستون؛ ۲. سیلندر؛ ۳. شاتون؛ ۴. رگولاتور مرکزگریز؛ ۵. اهرم فرمان توزیع؛ ۶. سوپاپ ورود سوخت؛ ۷. سوپاپ ورود هوا؛ ۸. مخزن سوخت.

لیسنده می‌نامیدند. در آن زمان، ۱۸۲۶، آقای آزارد[1] از یک وسیلهٔ پیچیده‌ای استفاده می‌کرد که جدار آن با سوخت آغشته می‌شد تا به موتوری که در بالا از آن سخن رفت سوخت رسانیده شود. آقای بریتون در سال ۱۸۷۳، همان‌طورکه دیدیم، یک نمد را بین دو صفحهٔ آهنی مشبک قرار می‌داد. از میان این اصلاحات، تنها کاربرد شناوری برای ثابت نگهداشتن تراز بنزین درکاربوراتورهای لیسنده را می‌توان کار جالبی به‌شمار آورد.

1. Hazard

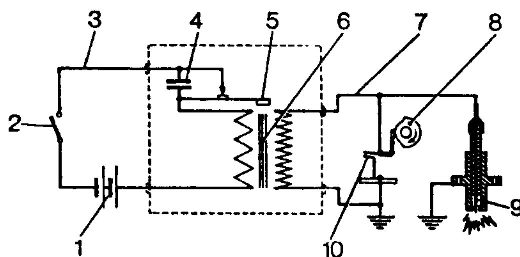


شکل ۸۳.کاربوراتور ژیگلوری مایباخ (۱۸۹۳).
۱. سیلندر حرکت؛ ۲. سوپاپ سوخت؛ ۳. مجرای ورود سوخت؛ ۴. ژیگلور؛ ۵. گلویی؛ ۶.لولهٔ بنزین؛ ۷. محفظهٔ با تراز ثابت؛ ۸. شناور؛ ۹. ساسات (چوک)؛ ۱۰. لولهٔ بنزین.

وسایلی که پیشنهاد شدند بسیار متنوع بودند و هر تکنسین موتور، در این‌باره نظرات خاص خود را داشت. پس از ده سال آشفتگی، نخستین کاربوراتور ژیگلوری (افشانکی) را در سال ۱۸۹۳ آقای ویلهلم مایباخ‌ساخت (شکل ۸۳).مایباخ با کاربرد یک گلویی که همگرا ـ واگرا بود، یک ژیگلور و یک پیالهٔ شناور، مشکل را برای همیشه حل کرد. در همان سال، کارل بنز به این سیستم، دریچهٔ پولکی را افزود تا مقدار سوختی که وارد سیلندر می‌شود طبق خواست راننده باشد.

طبیعتاً در آن زمان و تا زمان ما، کاربوراتور اولیه دست‌خوش تغییرات زیادی بوده است. از جمله آقای لونگمار، حدود سال ۱۸۹۹ در تلاش برای تأمین ترکیب ثابتی از مخلوط گازی بود. اما بزودی معلوم شد که غنای مخلوط گازی باید همراه با رژیم موتور، راه‌اندازی، شتاب‌یافتن، آهسته شدن و ... تغییر کند. بدین‌ترتیب با شروع سال ۱۹۰۰ وسایل گوناگونی عرضه شد که به این تغییرات پاسخ می‌دادند. کاربوراتور با ژیگلور غرق شده در اول بوسیلهٔ آمده بوله (پسر) در سال ۱۸۶۹ طرح شد و بعدها آقای سولکس[1] خود را وقف آن ساخت. کاربوراتور با ژیگلور جبرانی در سال ۱۹۰۵ بوسیله باوری[2] ساخته شد، سپس با نام زنیت[3] و ... شهرت یافت.

1. Solex 2. Baverey 3. Zenith



شکل ۸۴.مکانیسم اشتعال اختراعی بنز (۱۸۸۵).
۱. پیل الکتریکی؛ ۲. کنتاکت؛ ۳. مدار اولیه؛ ۴. خازن؛ ۵. لرزنده؛ ۶. قرقرهٔ القا؛ ۷. مدار ثانوی؛ ۸. بادامک؛ ۹. شمع؛ ۱۰ پلاتین.

این سیستم تزریقی در پایان سده، تنها برای سوخت‌رسانی به موتورهای دیزل ساخته شد و دربارهٔ آن باز سخن خواهیم گفت. پس از سال ۱۹۳۰ بود که برای موتورهای بنزینی هواپیما و حدود سال ۱۹۰۵ برای موتورهای اتومبیل پذیرفته شد.

اشتعال: اشتعال با شعله که متناسب موتورهای گازی صنعتی بود به‌علت خطر انفجار و محدود بودن طرز کار آن، برای موتورهای بنزینی نامتناسب بود، کوششی، البته بدون موفقیت زیاد، برای ایجاد اشتعال بوسیلهٔ لامپهای ملتهب انجام گرفت.

سرانجام، تنها روش اشتعالی که پس از سال ۱۹۰۰ باقی ماند اشتعال برقی بود. این کار با تغذیهٔ شمع بوسیلهٔ یک مدار ثانوی قرقرهٔ القاء توسط یک توزیع‌کننده شروع شد (شکل ۸۴).اما باطریها بسیار زود تخلیه شدند؛ و بنابراین، برای رفع این نقیصه کوشیدند. لنوار در سال ۱۸۸۵ نوعی شمع بسیار پیشرفته طرح کرد که تقریباً مشابه شمعهایی است که امروز به‌کار می‌روند. آقای بنز در سال ۱۸۹۳ توزیع‌کننده‌ای را در مدار اولیهٔ کم‌فشار قرقرهٔ القا جا داد و بدین‌ترتیب تخلیه آن را آهسته کرد.

در این طرح بنز، امکان تغییر دادن دستی زمان اشتعال، به واسطه میله‌ای که روی توزیع‌کننده عمل می‌کرد، پیش‌بینی شده بود. این تغییر زمان اشتعال گرچه کاری کوچک بود اما برای خوب کار کردن موتوری که بعدها خودکار شد بسیار اهمیت داشت.

آقایان دیون[1] و بوتون[2] در سال ۱۸۵۹ وسیلهٔ بنز را تکمیل کردند. آنان به‌جای توزیع‌کنندهٔ دارای کنتاکت ساده، از توزیع‌کنندهٔ بادامکدار استفاده کردند و بدین‌ترتیب از دقت بسیار بزرگتری در تولید جرقه بهره‌مند شدند.

1. Dion 2. Bouton

این سیستم اشتعال با باتری و قرقرهٔ القا با توزیع‌کنندهٔ کم‌فشار در سال ۱۹۰۰ عمومیت یافت. برای موتورهای چند سیلندری برای هر سیلندر یک قرقره به‌کار می‌رفت.

آقای نپر در سال ۱۹۰۳ به توزیع با فشار قوی بازگشت. وی برای موتورهای چند سیلندری، یک قرقره به‌کار می‌برد اما با توزیع‌کنندهٔ دارای فشار قوی و بادامک چندجانبه برای فرمان دادن به کلید بود تا جریان فشار ضعیف مدار اصلی قطع شود. این طرح نپر، پایهٔ اشتعال جدید است.

در همین دوران اشتعال بوسیله مگنت شروع به طرحریزی شد تا نقص تخلیهٔ سریع باتریها از بین برود.

نخستین مگنت را گیزنبرگر[1] در ۱۸۸۰، فرنان فوره در ۱۸۸۳ـ۱۸۸۴ و اوتو در ۱۸۸۴ ساختند که از نوع مگنتهای «فشار ضعیف» بودند. این مگنتها دارای القاگری بودند که حول محور خود، بین دو قطب یک آهنربا، به‌کمک بادامکی نوسان می‌کردند. در این شرایط یک جریان متناوب از مدار می‌گذشت. این مدار به کلیدی وصل می‌شد که در محفظهٔ احتراق کار گذاشته شده بود، و بدین‌ترتیب دو سر آن در لحظهٔ حداکثر فشار در هر نیم دور، به‌طور مکانیکی از یکدیگر جدا می‌شدند و جرقه می‌زدند.

باید به پیچیدگی مکانیکی این سیستم توجه کرد، سیستمی که نخستین راه‌حل پیشنهادی برای کاربرد مگنت برای اشتعال را ارائه داشت. چنانچه جزئیات نمونه‌های متعدد دیگر را به‌هم نزدیک کنند، ـ که برخی از آنها در صفحات پیش شرح داده شده‌اند ـ با نوعی پیشرفت تقریباً عمومی خلاقیت تکنیک روبه‌رو می‌شویم: در میدانی که بتازگی گشوده شده است، راه‌حلهایی که در آغاز پیشنهاد می‌شوند معمولاً پیچیده‌تر از راه‌حلهایی هستند که در پرتو تجربه به‌دست آمده‌اند و عملی هستند.

در رابطه با مگنت، بازهم باید یادآور شد که برای جلوگیری از اشتعال پیش از موقع، بعداً بادامک دیگری افزوده شد. کمی جابه‌جا شدن این بادامک در پشت بادامک قبلی، سبب می‌شود که ایجاد جرقه نسبت به لحظهٔ راه‌اندازی عقب بماند. مزیت مگنت ایجاد منظم قوسهای با شدت زیاد برای هر سرعت گردش موتور است. اما این بادامک برای موتورهای بسیار سریع مناسب نبود. وانگهی موضع کنتاکتها درون محفظهٔ احتراق، که به دشواری انجام می‌گرفت، معمولاً ضایع می‌شد.

برای بهبود این سیستم اشتعال بی‌درنگ به تکاپو افتادند. به‌دنبال این کوششها بود که مگنت «با فشار بالا» ساخته شد؛ راه‌حلی بسیار هوشمندانه، که شامل گردانیدن یک قرقرهٔ القا بین دو قطب یک آهنربای دائم، حول محور عمودی آن بود. بدین‌ترتیب مگنتی ساخته شد که القاگیر

1. Giesenberger

(روتور) آن، سیم‌پیچ ورودی قرقره بود و این سیم‌پیچ در پرتو آرایش عادی خود جریان با فشار بالایی را در سیم‌پیچ خروجی القا می‌کرد. می‌توانستند به شمعهایی که با سیم‌پیچ تغذیه می‌شدند و یک توزیع‌کننده مراجعه کنند. نخستین مگنت با فشار بالا را آقای گوتلیب هونولد[1] با مشارکت روبرت بوش در سال ۱۹۰۲ ساختند. اما این مگنت را قبلاً مهندسی بلژیکی با نام پل ویتان[2] که در دویتس کار می‌کرد در سال ۱۸۸۷ ساخته بود. مؤسسه روبرت بوش که وقف ساختن قسمتهای برقی موتورها شده بود بعدها نخستین مگنت با فشار بالا را ساخت.

این سیستم بعدها در نوع بسیار محکم خود با آهنربای دائمی گردنده و قرقره‌های ثابت ساخته شد. گاهی، بویژه در مورد موتور هواپیما، هر دو سیستم اشتعال، با باتری و با مگنت دارای فشار بالا، موازی یکدیگر به‌کار گرفته می‌شوند. پس از یک دوره رقابت فشرده این دو سیستم برای موتورهای اتومبیل، از سال ۱۹۲۵ اشتعال با باتری غالب شد.

خنک‌سازی و روغنکاری: مسألهٔ خنک‌سازی پس از تجسس کوتاهی حل شد. آقای ویلهلم مایباخ در سال ۱۸۹۲ روی موتور *Phoenix* به‌کار گرفتن یک چرخ طیار را که با آب در جهات محیطی می‌گردید تجربه کرد. آقای پژو[3] در سال ۱۸۹۶ آب را در شاسی اتومبیل گردانید. مایباخ در سال ۱۸۹۷ با ساختن نخستین رادیاتور لوله‌ای به حل مسأله بسیار نزدیک شد. این رادیاتور بسیار سنگین و گران بود، اما بخوبی خنک می‌کرد و به‌کمک وی، دایملر ـ مایباخ توفیق یافتند موتورهای قویتری بسازند.

مایباخ در سال ۱۹۰۱ نوع دیگری رادیاتور ساخت که کمتر سنگین و فضاگیر بود. این رادیاتور همان «کندویی» بود که از آن پس تنها رادیاتور آبی موتورهای درونسوز باقی ماند. این رادیاتور با پروانه‌ای که موتور آن را می‌گردانید. تکمیل شد.

دربارهٔ روغنکاری، ساخت موتورهای دارای کارتر بسته و کاربرد آن به‌عنوان مخزن روغن، روغنکاری با هم‌زدن میل لنگ در ظرف روغن را ممکن ساخت. راه‌حل دیگر با گردانیدن روغن نیز بوسیلهٔ پنار[4] سپس روغنکاری تحت فشار برای نخستین بار بوسیلهٔ دیون ـ بوتون در سال ۱۹۰۳ در اتومبیلهای دلونه ـ بل ویل پیشنهاد شدند.

موتورهای اتومبیل مرحلهٔ نخست: همین‌که ماشین بخار دوطرفه در دسترس قرارگرفت برای کاربرد آن در راندن وسایل راهپیما کارهای گوناگونی انجام گرفت. در مجلد سوم این اثر چند نمونه داده شده است. اما ماشین بخار برای عمومیت یافتن این نوع حرکت، نارساییهایی داشت: تأخیر در تحت فشار قرارگرفتن، وزن زیاد آب، وزن سوخت. بدین‌ترتیب گرچه در جریان سدهٔ نوزدهم کارهای

1. G. Honold 2. P. Winand 3. peugeot 4. Panhard

متعددی به نتایجی رسیدند که می‌توانستند امید به موفقیت را در دلها شکوفا سازند ـ بویژه کارهای: گورنه، آمده بوله، سرپوله ـ اما همین‌که موتور بنزینی به درجه‌ای از تکامل رسید، تعیین شد که این نوع موتور تنها راه‌حل مشکلات آینده است. همین‌طور می‌توان گفت که امکان حرکت مکانیکی روی جاده‌ها، راه تکامل موتور بنزینی را معین ساخت.

با این‌همه، اثبات این ادعا یک دهه به درازا کشید. در واقع لازم بود که برای سازگارکردن خود موتور، تعدادی مشکل کوچک مکانیکی حل شود.

دلامار ـ دبوت ویل و مالاندن نیز در سال ۱۸۸۴ در سازگارکردن موتورهای *Simplex* برای پیش بردن یک وسیله، بدون موفقیت کارهایی کردند، اما به مرحلهٔ تولید صنعتی دست نیافتند. نتایج کارهای لنوار و ماشین‌سازان وی، برادران روار، زیاد مورد اعتماد نیست.

بسیار دیده شده است که ماشینی را که آقای زیگفرید مارکوس[1] در سال ۱۸۷۵ در وین ساخته است با تاریخ اشتباهی ۱۸۶۴، اولین اتومبیل معمولی می‌دانند. آقای بون ویل از مدتها پیش نشان داده است که این ادعا کاملاً بر خطاست و حتی ثابت کرده است که نوعی حقه‌بازی است. رساله‌ای اخیراً (مارس ۱۹۷۵) مربوط به موزهٔ تکنیکها در وین یک سالشمار نهایی برای کارهای مارکوس به چاپ رسانیده است که نشان می‌دهد هرکدام از ساخته‌های وی پس از ساخته‌های نوآوران مختلف در انواع موتورها انجام گرفته‌اند. بویژه اتومبیل مشهور احتمالاً ۱۸۷۵ وی، که یک موتور بنزینی چهارهنگامی داشت، تنها در سال ۱۸۸۸، یعنی چند سال پس از موفقیت نخستین کارل بنز، روبراه شد.

در حقیقت، کارل بنز در آلمان، پس از موفقیت موتور دوهنگامی خود در ۱۸۸۳، نخستین موتور مناسب اتومبیل را در سال ۱۸۸۴ ساخت. این موتور تک سیلندری افقی برپایهٔ چهارهنگامی بنزین مصرف می‌کرد و با ۳۵۰ دور در دقیقه ۰٫۸۸ اسب قدرت داشت. در سال ۱۸۸۶ این موتور را روی یک سه‌چرخهٔ دارای دیفرانسیل (برای انتقال حرکت) نصب کردند و در ژوئیهٔ ۱۸۸۶، نخستین اتومبیل آلمانی بود که حرکت می‌کرد. موتور آن هنوز نسبتاً سنگین و توان حجمی آن کم بود.

موتورهای سریع: نخستین کسانی‌که گمان داشتند که افزایش سرعت گردش موتور، وسیله‌ای اساسی برای کاستن از وزن و افزایش توان حجمی آن است، صنعتگران آلمانی ـ گوتلیب دایملر و ویلهلم مایباخ ـ بودند. آنان نخستین کسانی بودند که موتورهای سبکی با دور زیاد ساختند و راه به‌کارگیری موتورهای بنزینی را برای حمل‌ونقل با موفقیت گشودند.

1. Marcus Siegfried

نخستین موتوری که بوسیله مایباخ و دایملر برای داشتن ۶۰۰ دور در دقیقه ساخته شد از نوع افقی، بدون خنک شدن (سیلندر مفرغی)، چهارهنگامی و گازسوز بود. این موتور در سال ۱۸۸۳ ساخته شد. دایملر برای اشتعال، لامپ التهابی خود را در ارتباط مستقیم با محفظهٔ احتراق قرار داد و نوعی سیستم توزیع بسیار ابتکاری را در آن سوار کرد، بعدها این موتور به‌شکل عمودیش هم ساخته شد.

موتور دومی که با دور زیاد ساخته شد، اما دارای خنک‌کننده بود به نام *Standuhr* شهرت یافت و مایباخ در ۱۸۸۴ آن را ساخت. از خصوصیات این موتور این بود که کارتر آن بسته و به‌عنوان تلمبه روبشی کار می‌کرد؛ هوایی که در کارتر طی حرکت دتانت پیستون فشرده می‌شد طی حرکت تنفسی، بوسیله سوپاپی خودکار که در پیستون جاسازی شده بود، در سیلندر وارد می‌شد. این روش سوخت‌رسانی ـ روبش که کارتر انجام می‌داد و در آن زمان روی موتورهای دوهنگامی با موفقیت به‌کار رفته بود ـ برای موتورهای چهارهنگامی کارایی نداشت، بخصوص قفل و بست کارتر. بدون اینکه به‌عنوان تلمبهٔ رویش مورد استفاده باشد، کارتر قطعه جالبی در ساختمان موتور بود که از آن در برابر گردوخاک حمایت می‌کرد و بویژه همچون مخزن لازم برای سیستم روغنکاری به‌کار می‌رفت.

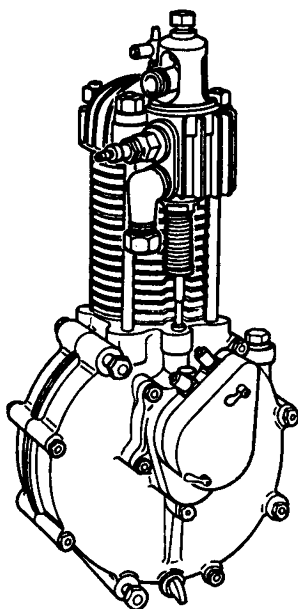
یک موتور *Standhur* که کاربوراتوری که مایباخ ساخته بود به آن بنزین می‌رسانید و هوا آن را خنک می‌کرد و در ۶۰۰ دور در دقیقه نیم اسب قدرت داشت روی دوچرخه‌ای نصب شد و برای اولین بار در نوامبر ۱۸۸۵ دوچرخه را راه برد.

موتور دیگری از آن با قدرت ۱٫۲ اسب که نخست با هوا سپس با آب خنک می‌شد در پاییز سال ۱۸۸۶ روی چهارچرخه‌ای با انتقال حرکت تسمه‌ای و نیز روی قایقی کارگذاشته شد.

تکامل موتورهای درونسوز بنزینی ویژهٔ اتومبیل در جهت افزایش قدرت و کاهش وزن برای هر اسب از طریق زیاد شدن سرعت دور موتور ادامه یافت.

ماشین‌سازان دیگری دست به‌کار ساخت موتورهای سریع شدند. کارل بنز در ۱۸۸۹ موتوری ساخت که با ۶۰۰ دور در دقیقه، سه اسب قدرت داشت و در سال ۱۸۹۳ موتور دیگری ساخت که با ۷۰۰ دور در دقیقه ۱٫۵ اسب قدرت آن بود و روی دوچرخه‌ای کارگذاشته شد.

حدود سال ۱۹۰۰ شرکت دیون ـ بوتون موتوری ساخت که سرعت گردش زیادی داشت و نیز دارای امتیاز سبکی، کمتر از ۱۰ کیلوگرم برای هر اسب بود (شکل ۸۵).تا پایان جنگ جهانی اول، سرعت موتورهای رایج از ۳۰۰۰ دور در دقیقه فراتر نرفت.

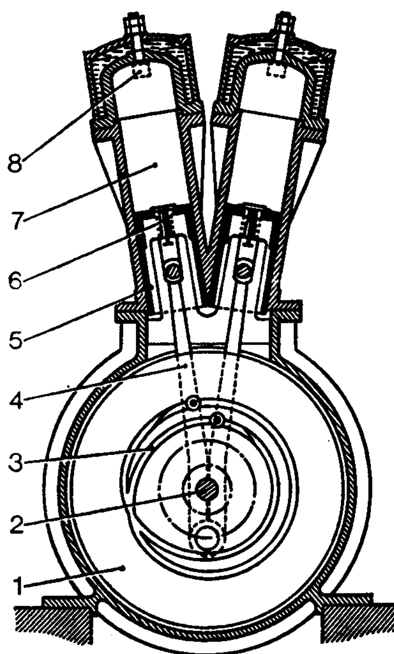


شکل ۸۵.موتور شرکت دیون ـ بوتون (حدود سال ۱۹۰۰).

موتورهای چند سیلندری: باید گفت که بازهم این دایملر و مایباخ بودند که در سال ۱۸۸۹ نخستین موتور سریع چند سیلندری را با دوتایی کردن موتور *Standhur* خود، ساختند. این موتور تازه همان موتور مشهور دو سیلندری خورجینی، V شکل، با زاویه ۱۷ است (شکل ۸۶).او در آغاز همهٔ مشخصات *Standhur* را داشت: کارتر بسته شده که همچون تلمبهٔ رویشی عمل می‌کرد، توزیع با سوپاپ خودکار تنفسی، اشتعال با لامپ ملتهب و بالاخره خنک شدن با آب. این موتور در ابتدا با ۶۰۰ دور در دقیقه ۱٫۵ اسب و سپس با ۶۲۰ دور در دقیقه دو اسب قدرت داشت.

این موتور روی وسیله‌ای که مایباخ برای آن طرح کرده بود گذاشته شد: شاسی از لوله‌های فولادی، انتقال حرکت با چرخدنده، جعبه دندهٔ چهار سرعتی (بین ۵ تا ۱۶ کیلومتر در هر ساعت)، کلاچ اصطکاکی مخروطی و هدایت با چرخهای جلو بود. این اتومبیل را که در نمایشگاه جهانی پاریس در ۱۸۸۹ عرضه شد می‌توان نخستین اتومبیل نوین دارای موتور درونسوز به‌شمار آورد.

پنار و لواسور در سال ۱۸۹۰ امتیاز دایملر را خریدند و نخستین سازندگان اتومبیل در فرانسه



شکل ۸۶.موتور خورجینی دایملر- مایباخ (۱۸۸۹).
۱. چرخ طیار درکارتر بسته ؛ ۲. اهرم حرکت‌دهنده؛ ۳. راهنمای سوپاپهای تخلیه گاز؛ ۴. شاتون؛ ۵. پیستون؛ ۶. سوپاپ خودکار ورود سوخت؛ ۷. سیلندر حرکت؛ ۸. سوراخ سوپاپ تخلیه و اشتعال با لامپ ملتهب.

و نیز نخستین فروشندگان اتومبیل در جهان شدند. آنان اصلاحات اساسی در ساخت این اتومبیل به‌عمل آوردند: گذاردن عمودی موتور در جلوی اتومبیل از آنهاست. آنها را می‌توان همراه دایملر و مایباخ خلاق اتومبیل جدید دانست.

آقای آرمان پژو که از ساخت اتومبیل با دیگ بخار سرپوله صرفنظر کرده بود از سال ۱۸۹۱ به ساخت اتومبیل با موتور دایملر پرداخت.

موتور دایملر علاوه‌بر فرانسه درکشورهای دیگر نیز راه یافت. در انگلستان آقای ف. ر. سیمز[1] امتیاز ساخت این موتور را در ۱۸۹۰ در انگلستان و مستعمرات آن به‌دست آورد. در امریکا اولین موتور دایملر حدود سال ۱۸۸۸ بوسیلهٔ ویلیام شتاینوی[2] وارد شد.

1. F. R. Simms 2. W. Steinway

این موتور بدلیل استفاده از یک سوپاپ تنفسی تحت فرمان، مورد اصلاحی قرارگرفت که در سرعتهای زیاد گردش و حذف سیستم روبش بوسیلهٔ کارتر، برای آن لازم بود.

این موتور جدید مایباخ ـ دایملر برای چند سال بهترین موتور اتومبیل بود. قدرت آن تا چهار اسب بالا رفت و این محدوده به‌علت افزایش وزن بدان تحمیل شده بود. اتومبیلهای پنار ـ لواسور و پژو با این موتور در نخستین مسابقهٔ اتومبیلرانی در سال ۱۸۹۴ پاریس ـ روان جایزهٔ نخست را به‌دست آوردند و در سال بعد پنار ـ لواسور در دومین مسابقه اتومبیلرانی پاریس ـ بوردو اول شد.

نخستین موتورهای هواپیما: موتورهای خورجینی (V شکل) بعدها با ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ سیلندر ساخته شدند. از میان موتورهای خورجینی بسیار مشهور، پیش از پایان‌جنگ جهانی اول، می‌توان از موتور *Antoinette* با ۸ سیلندر و ۳۴ اسب قدرت نام برد که لئون لواواسور مهندس فرانسوی در سال ۱۹۰۵ آن را برای یک قایق موتوری ساخته بود، و دومی آنکه ۱۶ سیلندر و ۵۰ اسب قدرت داشت هواپیمای مشهور *Demoiselle* متعلق به آقای سانتوس ـ دومونت[۱] را مجهز ساخت. با همین هواپیما بود که سانتوس دومونت در سال ۱۹۰۶ به باگاتل[۲] پرواز کرد و بدین‌ترتیب نخستین پرواز را در اروپا انجام داد. همین موتور را آقای کورنو[۳] در سال ۱۹۰۷ روی نخستین هیلکوپتر کار گذاشت و برادران ووازن[۴] (گابریل و شارل) روی هواپیمایی که خود ساخته بودند؛ و باز با همین موتور آقای هنری فرمن[۵] در سال ۱۹۰۸ برای نخستین‌بار یک کیلومتر به ایسی‌ـله‌ـمولینو[۶] پرواز کرد. در همین زمان است (۱۹۰۸) که موتور هشت سیلندری Vشکل ۹۰ درجه با تنها میل سوپاپ را دیون ـ بوتون برای اتومبیلی ساختند.

نوع دیگری از ساختهای حرکتی، آرایش خطی ۲، ۴، ۶، ۸ سیلندری بود. موتور چهار سیلندری خطی را آقای فرنان فوره در سال ۱۸۸۹ طرح کرد. این موتور از نوع چهارهنگامی با اشتعال الکتریکی بود. سوپاپ تنفسی آن، مانند سوپاپ فرارگاز، خودکار و با تأخیری بسته می‌شد تا سیلندر بهتر پر شود. این موتور روی کشتی تفریحی *Ellen* کار گذاشته شد.

موتورهای دیگری از این نوع بسرعت ساخته شدند: موتور مایباخ در ۱۸۹۰ که با ۶۲۰ دور در دقیقه ۵ اسب قدرت داشت و برای هر اسب، ۳۰ کیلوگرم وزن؛ موتور فوره در ۱۸۹۱ نخستین موتوری که مدت تنفس آن متغیر بود و به مقدار لغزش میل سوپاپ بستگی داشت. موتور ده اسبی

---

۱. Santos-Dumont آلبرتو ۱۸۷۳ ـ ۱۹۳۲، مهندس و فضانورد برزیلی، متولد پالمیرا که از ۱۸۹۱ تا ۱۹۲۸ در فرانسه اقامت داشت.

۲. Bagatelle کاخی که در ۱۷۷۷ درکنار جنگلهای بولونی برای کنت آرتوا ساخته شد.

3. Paul Cornu 4. Voisin 5. H. Farman 6. Jssy-les-Moulineaux

ساخت پنار در ۱۸۹۸ مخصوص اتومبیل، نخستین موتور چهار سیلندری خطی بود که نسبت به یک صفحهٔ میانی عمود بر محور میل‌لنگ متعادل بود. این موتور اتومبیل رنو در سال ۱۹۰۲ ساخته شد. موتور پرآوازهٔ مرسدس که روی یک هواپیما و بالونهای هدایت شونده زپلین کارگذاشته شد. این موتور را پاول دایملر در ۱۹۰۷ ساخت، با ۱۴۰۰ دور در دقیقه، ۱۳۵ اسب قدرت داشت، برای هر اسب، دو کیلوگرم. این موتور برای بالون هدایت‌شونده زپلین ساخته شده بود، اما برای هواپیما نیز به‌کار گرفته شد.

در امریکا نخستین موتور را با ۱۲ اسب قدرت برادران رایت[1]: اورویل و ویلبر در سال ۱۹۰۲ ساختند. و با آن توانستند در ۱۷ دسامبر ۱۹۰۳ به کیتی ـ هاک[2] پرواز کنند و بدین‌ترتیب عصر هوانوردی آغاز شد. این یک موتور افقی بود که با آب خنک می‌شد. اشتعال آن با برق بود و ۱۰۹ کیلوگرم وزن داشت. این موتور دو ملخ را به‌کمک دو زنجیره دو چرخه می‌گردانید. پس از آن موتوری با ۸۰ اسب در سال ۱۹۰۴ به وسیلهٔ فورد برای اتومبیلش ساخته شد و از آن پس موتور ۲۰ اسب بود که برای اتومبیلهای معروف فورد T ساخته شدند.

تحقیق برای ایجاد تعادل: در همین زمان موتورهای سیلندر خطی به‌علت کیفیت بسیار خوب تعادل و یکنواختی کوپل (گشتاور پیچشی) در آنها بسیار متداول شده بودند.

موتورهای هشت سیلندر خطی نیز ساخته می‌شدند که می‌توان از موتور بالون هدایت‌شونده ساخت دایملر در ۱۹۱۱ نام برد که ۲۴۶ اسب قدرت داشت و در هر دقیقه ۱۲۰۰ دور می‌گردید.

مؤسسه دیون ـ بوتون در ۱۸۹۵ نخستین موتور دارای دو سیلندر متقابل معروف به *flat-twin* را ساخت. موتور دیگری از همین ردیف را آقای بنز در ۱۸۹۶ در انواع مختلف از ۵٫۹ و ۱۴ اسب و با ۹۰۰ دور در دقیقه ساخت. آقای ف. و. لنچیستر[3] نخستین سازندهٔ موتور اتومبیلهای انگلیس بود. در سال ۱۸۹۶ نخستین موتور و در سال بعد موتور دوم را از همان نوع ساخت. این موتورها دارای مزیت کوچکی حجم و تعادل خوب در حرکت بودند.

موتورهای با سیلندرهای ستاره‌ای (شعاعی)، ویژهٔ هواپیما بودند و در سال ۱۸۸۸ ساخته شدند. محورهای سیلندرها در یک یا چند صفحهٔ موازی قرار داشتند. چنین می‌نماید که نخستین موتور این گروه را لالبن[4] فرانسوی در نانت ساخته است. در طرح این موتور، وی از ماشین بخار برادرهود و وستینگهاوس الهام گرفته بود. فرنان فوره نیز در سال ۱۸۸۸ یک موتور ستاره‌ای با ۳۲ سیلندر طرح کرد که در چهار ستاره قرار داشتند، هشت سیلندر در هر صفحه. مؤسسه دیون ـ بوتون

1. Wright (Orville & Wilbur) 2. Kitty-Hawk 3. F. W. Lanchester 4. Lalbin

در سال ۱۸۸۹ بوسیلهٔ آقای دولند، موتوری با ۱۲ سیلندر در یک صفحه ساخت که با هوا خنک می‌شد. از میان موتورهای دیگر ستاره‌ای این دوران می‌توان از موتور آنزانی[1] با سه سیلندر با قدرت ۲۵ اسب نام برد که لویی بلریو آن را روی هواپیمای خود Blériot-XI کارگذاشت و با آن هواپیما در سال ۱۹۰۹ از روی مانش پرواز کرد.

موتورهای دورانی نخستین را آقای فلیکس میله فرانسوی در سال ۱۸۸۷ ساخت، موتوری با پنج سیلندر با اشتعال برقی و توزیع بوسیلهٔ کشویی گردان. این موتور روی یک سه‌چرخه و موتوسیکلت به‌کارگرفته شده بود. آقای لاورنس هارگریو[2] استرالیایی نیز در همان سال برای هواپیما از آن استفاده کرد. بعدها موتورهای دورانی دیگری بوسیلهٔ دیون در ۱۸۸۹ و در همان سال آمده بوله پسر، ویل دانیل (۱۸۹۸) ساخته شدند.

یک موتور دورانی که اکثراً همچون نخستین ساخت صنعتی این نوع موتور شناخته شده است موتور *Gnome* ساختهٔ لویی ـ لوران سگن، مهندس فرانسوی در سال ۱۹۰۸ می‌باشد. این موتور با ورود گازها از راه کارتر بوسیلهٔ یک سوپاپ اتوماتیک در پیستون و سوپاپ خروج گازهای سوخته شده در سرسیلندرها پیش‌بینی شده بود؛ و با هوا خنک می‌شد.

تکامل این موتور به موتور *Gnome-Rhône* با نه سیلندر به قدرت ۱۰۰ اسب برای وزن ۲۷۰ کیلوگرم انجامید، که می‌توان آن را رایجترین موتور هواپیماهای متفقین در زمان جنگ جهانی اول دانست. ظاهراً این موتور با پایان گرفتن این جنگ به چند علت مکانیکی به کناری گذاشته شد.

به‌نظر می‌رسد که بمحض رفع مشکلات اصلی موتورهای چهارهنگامی با انواع فراوانی از راه‌حلها عرضه شدند، و مورد قبول قرارگرفتند. به مطالب گفته شده، این نکته را هم باید افزود که موتورهای به‌شکل X (ضربدری یا خاجی) و موتورهای به‌شکل Y با تعداد زیادی از سیلندرها در سال ۱۸۹۵ بوسیلهٔ فرنان فوره مورد مطالعه قرارگرفتند و در زمان جنگ جهانی اول، روی هواپیماها کارگذاشته شدند و نیز موتورهایی با پیستونهای متقابل که شرکت گوبرون ـ بریلیه[3] در سال ۱۸۹۹ کار زیادی روی آن انجام داد، اما رواج مورد انتظار را روی اتومبیلها نیافت.

اکثر این آزمایشها و نیز راه‌حلها، به هدف اصلی تأمین تعادل موتور و حذف لرزشهای آن در زمان کار توجه داشتند.

---

1. Anzani

۲. L.Hargrave ۱۸۵۰ ـ ۱۹۱۵ در انگلستان زاده شد، اما در ۱۸۶۶ به استرالیا رفت

3. Gobron-Brillié

میزان تراکم و افزایش فشار: میزان تراکم در موتورهای انفجاری اتومبیلها آهسته فزونی می‌گرفت؛ تقریباً از سه در موتورهای دایملر تا ۴ یا ۵ در موتورهای پایان جنگ جهانی اول. وانگهی میزان تراکم نمی‌توانست از این مرز، بسیار پایین، در آن وضع موتور و بنزین آن زمان، بالاتر رود زیرا خطر ترکش پدید می‌آمد.

کوششهایی هم روی باز و بسته شدن سوپاپها و سیستمهایی که اداره‌کنندهٔ این وظایف هستند به‌عمل آمد تا بهترین اجرای ممکن سیلندرها در مخلوط سوخت تأمین شود. در سال ۱۸۸۹ نخستین موتور چهار سیلندری خطی فوره دارای یک سوپاپ تنفسی بود که خودکار عمل می‌کرد و با کمی تأخیر بسته می‌شد. سپس، در آغاز این سده، تقریباً همهٔ موتورهای اتومبیل به سیستم توزیع خودکار مجهز شدند. نخستین موتور چهار سوپاپی برای هر سیلندر (دو سوپاپ برای ورود و دو سوپاپ برای خروج) که هر چهار عدد آن از یک میل سوپاپ فرمان می‌گرفتند در سال ۱۹۱۴ بوسیلهٔ بوگاتی[1] ساخته شد.

افزایش فشار، عملاً فقط پس از پایان جنگ جهانی اول به‌کار گرفته شد، درحالی‌که اصول و آزمایشهای اولیه در این‌باره، پیش از آغاز جنگ، شناخته شده بودند.

سوخترسانی به‌کمک تلمبه، روشی کهن است، زیرا این روش در تعدادی از موتورهای بدون تراکم قبلی متعلق به دوران پیش از لنوار به‌کار رفته بود. بعدها در همهٔ موتورهای دوهنگامی با تراکم قبلی که از کارتر به‌عنوان یک تلمبه استفاده می‌کردند یا خود تلمبهٔ کمکی داشتند از این روش استفاده شد. حتی گفته شده است که موتورهای چهارهنگامی، نظیر *Standhur* نیز چنین بوده‌اند اما این نوع سوخت‌رسانی در فشارهایی عملی است که از فشار جوّ، به مقدار ناچیزی بیشتر باشند و نقش تلمبه بیشتر در روبش سیلندر از گازهای سوخته شده خلاصه می‌شود.

در موتورهای دوهنگامی که برای کار کردن، همواره به تلمبه نیاز دارند تشخیص یک موتور با تراکم از یک موتور دارای افزایش فشار، دشوار است؛ و تفاوت یک تلمبهٔ روبشی با تلمبهٔ فشار زیاد، تنها در مقدار فشار سوخت‌رسانی است.

بعدها قرارداد شد که چنانکه فشار سوخت‌رسانی از فشار هوا ۱۰٪ بیشتر نباشد بتوان آن را تلمبهٔ روبشی نامید و اگر بیشتر باشد، یک تلمبه فشار زیاد است.

با چنین دیدی موتور دو هنگامی طرح آمده بوله، پسر، در ۱۸۹۵ را می‌توان همچون یکی از اولین موتورهای با فشار زیاد به‌شمار آورد. روبش گازهای سوخته شده بوسیلهٔ کارتر جای خود را به «پروانه سوخت‌رسانی» داد که بوسیلهٔ موتور گردانیده می‌شد.

1. Bugatti

در همین سال در انگلستان آقای ج. ه. همیلتون، افزایش فشار به موتورها را بررسی کرد. این بررسیها حدود سال ۱۹۰۵ بوسیلهٔ دوگلدیل کلرک و ا. بوچی[1] ادامه یافتند. شخص اخیر برای به‌کار گرفتن یک دَم توربینی، که گازهای خروجی آن را فعال می‌ساخت کوششهایی کرد. این سیستم با یک موتور دیزلی که برادران زولستر آن را در ۱۹۱۱ ساخته بودند انطباق داده شد.

اگوست راتو در سال ۱۹۱۶ نخستین موتور را با افزایش فشار ویژهٔ هواپیما را، با یک کمپرسور توربینی که در ۳۰۰۰۰ دور در دقیقه ۵۰ اسب قدرت و ۲۳ کیلوگرم وزن داشت، ساخت.

کمپرسورهای افزایش فشار نیز بوسیلهٔ محور محرک (اصلی) به‌طور مکانیکی فعال می‌شدند. این راه‌حل اقتصادیتر بود. اما به‌هنگام کار کردن گرانتر تمام می‌شد. نخستین اختراعی که در این‌باره به ثبت رسید از آن پل دانیل در سال ۱۹۱۲ بود. این راه‌حل روی موتورهای احتراقی هواپیما پس از سال ۱۹۲۹ به‌کار گرفته شد با اینکه در آن زمان، حین جنگ جهانی اول شرکتهای دایملر و بنز آزمایشهای آن را انجام داده بودند.

آلیاژهای آلومینیم: آلیاژهای سبک آلومینیم خیلی زود در ساختن بعضی قطعات موتور به‌کار گرفته شدند. حتی پیش از سال ۱۹۰۰ شرکت دیون ـ بوتون کارترهای بعضی از موتورهای اتومبیل یا هواپیمای خود را از آلومینیم می‌ساخت. پیستونهایی از آلیاژ آلومینیم حدود سالهای ۱۹۱۰ یا ۱۹۱۱ در موتورهای اتومبیلهای *Alphonse-XIII* که شرکت Hispano-Suiza آنها را می‌ساخت دیده شدند. نیروهای ماند (اینرسی) به‌طور قابل توجهی کم شده بودند. کاربرد آلیاژ بویژه برای موتورهای هواپیما و پیستونهای همهٔ موتورهای خودرو، بزودی عمومیت یافت.

پیشرفت در ساخت اتومبیل: همهٔ پیشرفتهای مربوط به موتورهای انفجاری در متن یک پیشرفت سریع صنعت ساخت اتومبیل از اواخر سدهٔ نوزدهم و هواپیماسازی از پایان دههٔ نخست سدهٔ بیستم بوده است.

در آلمان، سازندگان دایملر و مایباخ در سال ۱۸۹۰ شرکت Daimler Motoren Gesellschaft AG را تأسیس کردند. مایباخ در سال ۱۹۰۰ نخستین مرسدس را ساخت و بنز به ساختن خودرو در کارخانجات خود Benz & Cie Rheinische Automobil und Motorenfabrik AG ادامه داد. آدام اوپل[2] شرکت اوپل را در روسلس‌هایم[3] تأسیس کرد و از سال ۱۸۹۸ به ساخت خودرو پرداخت.

در فرانسه، نخستین کشوری که تولید اتومبیل برای فروش در آن ایجاد شده بود: پنارـ لواسور

1. A.Büchi 2. Adam Opel

۳. Russelsheim شهری در ایالت هسه درکنار ماین در آلمان.

نخستین مؤسسه‌ای بود که وارد این میدان شد و سلطهٔ تولید جهانی اتومبیل را تا سال ۱۹۰۰ در دست داشت. پژو و شرکا که در ۱۸۹۱ به «Les fils de Peugeot fréres» تغییر نام یافت پس از رها کردن تولید ماشینهای بخار، دومین سازندهٔ خودروهای بنزینی شد. مؤسسه دیون - بوتون نیز ساخت موتورهای بخاری را رها کرد و از سال ۱۸۹۴ به تولید اتومبیل پرداخت. مؤسسه برادران رنو پس از اینکه لویی رنو در سال ۱۸۹۸ نخستین خودرو خود را، که با موتور دیون - بوتون و نیز جعبه دنده بی‌واسطه و انتقال حرکت بوسیله محور و دیفرانسیل مجهز شده بود ساخت، در سال ۱۸۹۹ تشکیل شد.

در انگلستان وجود فرمان «Locomotive Act» که تنها در سال ۱۸۹۶ پس گرفته شد مقرر می‌داشت که در پیشاپیش هر خودروی که حرکت می‌کند یک نفر پیاده با پرچم قرمزکوچکی حرکت کند، همین امر تا این تاریخ پیشرفت اتومبیل‌سازی را فلج کرده بود. آقای ف. ر. سیمز که جواز ساخت از دایملر داشت حدود سال ۱۸۹۶ شرکت The Daimler Motor Company را تشکیل داد. نخستین خودرو به سبک انگلیسی را آقای ف. و. لنچیستر در ۱۸۹۶ ساخت. پس از آن مؤسسات متعدد اتومبیل‌سازی تشکیل شدند که از آن میان می‌توان از: Percy Riley ۱۸۹۸، ۱۸۹۹ Humbers، ۱۹۰۲ Singer، ۱۹۰۳ Wauxhall، ۱۹۰۳ Rover، ۱۹۰۴ Rolls-Royce، ۱۹۰۶ Austin، ۱۹۰۷ Hillman و غیره نام برد.

در ممالک متحدهٔ امریکا، برادران چارلز و فرانک دوریه[1] در سال ۱۸۹۳ در ماساچوستس خودرویی ساخته بودند که با یک موتور بنزینی دوهنگامی حرکت می‌کرد؛ و بعد در ۱۸۹۵ خودروی دیگری ساختند که موتور چهارهنگامی داشت، اینان به‌عنوان نخستین اتومبیل‌سازان شناخته شدند. پس از سال ۱۸۹۷ بود که تولید اتومبیل برای فروش بوسیله شرکتهای: Pope Manufacturing واقع در هارتفورد و شرکت Winton Motor Carriage در کلیولند آغاز شد. در سال بعد، ۱۸۹۸، در این کشور حدود ۵۰ مؤسسه اتومبیل‌ساز بود. از آغاز ۱۸۹۹ نامهای بزرگ آیندهٔ این صنعت درخشیدند که از آن جمله می‌توان از مؤسسات زیر نام برد: ۱۸۹۹ Olds Motor Works که آقای رنسام ایلی اولدز[2] آن را پایه گذارد؛ Packard در ۱۹۰۰ که جیمز. و. پاکارد مؤسس آن بود؛ مؤسسه Cadillac در ۱۹۰۲ از هنری لیلند[3] و فالکونز[4]؛ Buick در ۱۹۰۲ وFord در ۱۹۰۳.

هنری فورد در ۱۸۹۶ در دترویت نخستین خودروی خود را روبراه کرد. موتور این خودرو

1. Frank & Charles Duryea 2. Ransom Eli Olds 3. H. Leland 4. Faulconer

چهارهنگامی بود و دو سیلندر داشت؛ آن را کین پنینگتون[1] ساخته بود. شرکت فورد بسرعت به‌روش تولید انبوه خودروهای بزرگ روی آورد، این روش از سال ۱۹۰۸ با مدل فورد T آغاز شد.

ماشین‌سازان بزرگ دیگر از جمله هنری لیلند، جیمز پاکارد بیشتر به کیفیت کار توجه داشتند. مؤسسه General Motors Company که بعدها غول‌آسا شد، در سال ۱۹۰۸ به توسط آقای ویلیام دورانت[2] از اجتماع چندین شرکت: بیوک، اولدزمبیل، کادیلاک، اوکلند و پونتیاک تأسیس شد.

در کشورهای دیگر، مثلاً ایتالیا (فیات در سال ۱۸۹۹ تأسیس شد)، استرالیا، کانادا، سوئد، روسیه، دانمارک شرکتهای اتومبیل‌سازی بزودی برپا شدند. در سال ۱۹۰۰ شمار مدلهای اتومبیلها ۲۰۹ عدد بود اما این تعداد در ۱۹۰۵ به ۷۰۰ رسید.

مبانی ساخت وسایل فضانوردی: صنعت فضانوردی در فرانسه پیشرفت سریعی داشت. نخستین نمایشگاه بین‌المللی فضانوردی در سال ۱۹۰۸ در پاریس برپا شد و بدین مناسبت ۱۵ مدل موتور هواپیما، که بیشتر آنها ساخت فرانسه بودند به‌نمایش گذارده شدند، که از آن میان می‌توان از: موتور *Antoinette*، لئون لواواسور[3] و موتورهای باریکان[4] و مار[5]،آقایان داراک[6]، رنو، اسنو ـ پلتری (روبر)[7]، فارکو، بوشه[8]، سگن و غیره نام برد.

سازندگان اولیهٔ هواپیما در مقیاس صنعتی در فرانسه به سال ۱۹۰۸ پدید آمدند. از نخستین آنها می‌توان از برادران ووزان (گابریل و شارل) در بیانکور[9]، برادران فرمن (هانری و موریس)، و لویی بلریو نام برد. در همان زمان در امریکا برادران رایت، در اتریش آنتولی فوکر[10]، در رومانی تریان وویا[11] و اورل ولایو[12] و در روسیه ایگور سیکورسکی[13] به ساختن هواپیما پرداختند.

دوران خوش موتورهای بنزینی: می‌توان گفت که همه ترکیبات احتمالی مربوط به موتورهای بنزینی و به‌طورکلی مربوط به اتومبیل تا پیش از سال ۱۹۱۴ مورد بررسی قرار گرفته بود. تکانی که جنگ جهانی اول به کاربرد موتورهای بنزینی داد بسیار قاطع بود. از همان پایان مخاصمات اتومبیل وسیله‌ای فردی شده بود و تا بیست سال برتری خود را از هر لحاظ حفظ کرد. هواپیما که قبلاً نوعی وسیلهٔ ورزشی شمرده می‌شد بوسیلهٔ حمل‌ونقل تبدیل گردید و در آستانهٔ جنگ جهانی دوم از فراز اقیانوسها می‌گذشت و آینده کشتیها مسافری را تهدید می‌کرد.

پیشرفتهایی که از حدود سال ۱۹۲۰ تا کنون در طراحی و ساخت موتوری بنزینی به‌وقوع پیوسته است تنها به کاربرد هرچه عاقلانه‌تر از همه چیزهایی که در دهه‌های نخست این تکنیک

---

1. Kane Pennington 2. William Durant 3. L. Levavasseur 4. Bariquand 5. Marre 6. Darracq 7. R. Esnault-Pelterie 8. Buchet 9. Billancourt 10. A. Fokker 11. Traian Vuia 12. Aurel Vlaieu 13. J. Sikorsky

پیشنهاد و یا آزمایش شده‌اند، مربوط می‌شوند. واقعیت بسیار جالب بدون تردید تحول بسیار برجسته موتورهای هواپیماست که به‌طور روزافزونی از موتورهای اتومبیل فاصله می‌گیرند.

نخست باید پذیرفت که افزایش قدرت موتورهای هواپیما را تنها مشکلات مربوط به ساخت و کار آن محدود می‌سازند و سرعت هواپیما ـ لااقل نوع ملخدار ـ عملاً هیچ مرزی نمی‌شناسد. اما سرعت اتومبیل به‌علت عوارض مادی، که شرح جزئیات آنها سودی ندارد، همیشه محدود بوده است.

افزایش توان ویژه که همیشه مورد علاقه سازندگان بوده است در موتورهای هواپیما پیشرفت چشمگیری داشت. پس از پایان گرفتن جنگ جهانی اول، توان موتور به ۴۰۰ اسب، یا برای هر اسب به ۱/۵ کیلوگرم رسیده بود و در پایان جنگ جهانی دوم این ارقام به ۱۲۰۰۰ اسب و ۰/۵ کیلوگرم برای هر اسب رسید. همین وضع برای سیلندرها و توان ویژه برقرار بود. افزایش توان ویژه با زیاد کردن میزان تراکم و افزایش فشار، که برای موتورهای هواپیماهایی که در ارتفاع زیاد پرواز می‌کنند ضروری است، حاصل شد.

مشکل احتراق ترکشی: تعمیم این دو وسیله، بی‌درنگ به چند دشواری فنی انجامید که در دوران قبل، به زحمت پیش می‌آمدند و هیچ وسیلهٔ مؤثری برای رفع آنها در دسترس نبود. مسألهٔ مربوط به پدیده‌های ترکش می‌شد که یا طی تراکم، خود اشتعالی، یا در جریان احتراق ایجاد می‌شد. از بین بردن این پدیده‌ها دو راه داشت: سازگار کردن مشخصات سوختها و اصلاح موتورها.

در طی سالهای ۲۰ این سده، مخلوط کردن بنزین با «مواد ضد ترکش» شروع شد. نخستین ماده ضد ترکشی که شناخته شد، تترااتیل سرب بود. رفته‌رفته روشهای تقطیر و دستکاری فراورده‌های نفتی بهتر شدند. روشهای کراکینگ (مولکول‌شکنی) حرارتی حدود سال ۱۹۲۵ تکمیل شد تا به نیازهای تازه به بنزین سبک پاسخ دهند. ده سال پس از آن روش کراکینگ کاتالیتی یوجین هودری[1]، ابداع و در امریکا در مقیاس صنعتی به‌کار گرفته شد.

استفاده از کاتالیزور برای کراکینگ به بهترین شکل، در سالهای ۹۱۵ـ۱۹۱۶ به ابتکار ا. م. مک‌آفی[2] مورد بررسی قرار گرفت. این شخص از نمک بی‌آب کلروآلومینیم به‌عنوان کاتالیزور استفاده می‌کرد. اما این کاتالیزور بسرعت بی‌اثر می‌شد و نمی‌توانستند آن را دوباره فعال سازند. طی سالهای ۲۰، هودری کار خود را شروع کرد، نخست در فرانسه، برای یافتن روشی برای تولید سوخت ترکش‌ناپذیر. روشهای کاربرد کاتالیزورها در آن زمان ترقی سریعی یافت. بااین‌حال، این تحقیقات، چند سال پس از بازگشت هودری به امریکا، باز هم ادامه داشت و بخاطر سودی که

1. Eugene Houdry   2. A.M.Mac Afee

چند شرکت صنعتی از آن چشم داشتند، دنبال شد. هودری با کاربرد نیکلی که با روش متناوب «بستر ثابت» آن را احیا می‌کرد به نتیجهٔ رضایتبخشی رسید. پس از سال ۱۹۳۵، انواع گوناگونی از روش هودری، به‌اصطلاح «بستر سیال» یا «بستر متناوب»، ـ برحسب روشی که برای احیای بستر کاتالیزور به‌کار گرفته می‌شد ـ پیاپی مورد استفاده قرار گرفتند. مجموعهٔ روشهای مولکول‌شکنی کاتالیتی، با امکان تهیهٔ مستقیم بنزینهای عالی برای هواپیما، مزایای بزرگی داشتند. این را می‌توان مهمترین تغییر شکلی دانست که در تصرفهای فراورده‌های نفتی در زمانی ایجاد شد که کاربرد آنها وارد مرحلهٔ بسیار گسترده‌ای شده بود.

طی همین دوران بود که مفهوم عدد اوکتان برای نشان دادن کیفیت یک سوخت در تحمل فشاری بیش وکم بالا شناخته شد. مخلوطی با نسبتهای متغیر از دو هیدروکربن سیر شده، هپتان، بسیار ترکشی، که تنها با عدد ۵ نشان داده می‌شد و ایزواوکتان که با عدد ۱۰۰ نمایش داشت را به‌عنوان سیستم مبنا پذیرفتند. همچنین لازم بود که برای تعیین عدد یک سوخت نسبت به‌مخلوطی از دو هیدورکربن مبنا، موتورها و روشهای ویژه‌ای ابداع کرد. عدد اوکتان بهترین سوختها در حوالی سال ۱۹۲۰ برابر ۵۰ بود (ترکیبی مانند مخلوطی از ۵۰٪ هپتان و ۵۰٪ ایزوکتان) توانست در حوالی سال ۱۹۲۵ با افزودن تترااتیل سرب به ۷۵ و در ۱۹۳۵ به ۸۵ برسد.

در رشتهٔ مربوط به اصلاح موتور، کوششها روی محفظهٔ احتراق متمرکز شد، قسمتی که در ۱۹۱۹ مورد بررسی هری ریکاردو[1] بود و نیز روی سیستم خنک کردن سر سیلندرها. ساختمان سرسیلندرهای ضد ترکش از آلیاژ آلومینیم با گرمارسانایی زیاد، نخستین بار بوسیلهٔ آقای کازت[2] مهندس فرانسوی در سال ۱۹۳۰ انجام گرفت و می‌توان آن را در فرآیند مبارزه با ترکش، یک مرحله به‌شمار آورد.

برای گریز از پدیده‌های ترکش، با تعویض روش سوخت‌رسانی از طریق کاربوراتور به سوخت‌رسانی تزریقی هم کوششهایی به‌عمل آمد. این روش از موتورهایی که با سوخت سنگین کار می‌کردند ـ دیزلها، که بعد دربارهٔ آنها سخن خواهیم گفت ـ الهام شد و در آغاز این سده مورد آزمایش قرار گرفت. اما تنها حدود سال ۱۹۳۴ و نخست برای موتور هواپیما پذیرفته شد و در این سال آقای ویوله مهندس فرانسوی سوخت را مستقیماً در سیلندرهای موتور هواپیما تزریق کرد و در همین زمان آقای لوره[3] که او هم فرانسوی بود تزریق را در مجراهای ورود سوخت انجام داد.

آخرین مراحل تکمیل: در چارچوب این اثر نمی‌توان همهٔ تحولات موتورهای بنزینی طی سی یا چهل سال اخیر را دنبال کرد. می‌توان گفت که مشخصهٔ آن، پذیرش و به کاراندازی همه راه‌حلهایی

1. Harry Ricardo 2. Cazette 3. Loré

بود که در دورهٔ پیش آزمایش شده بودند؛ مثلاً ساختمان و کار کاربوراتورها، سیستمهای توزیع با سوپاپ و بدون سوپاپ، انواع آرایش حرکتی و شمار دیگری از دشواریها، توجه سازندگان را، برای پاسخگویی به نیازهای جدید و بویژه نیازهای موتور هواپیما، یا برای عقب نماندن رقابتهای بازرگانی به خود جلب کرده بود.

مهمترین تحولی که ایجاد شد محققاً مربوط به موتور هواپیماست. پس ازکنارگذاشتن موتورهای دورانی، موتور V شکل است که تا پایان جنگ دوم جهانی اوج می‌گرفت با این حال، موتور ستاره‌ای، غیردورانی، بکلی کنار گذاشته نشد. آقای لیندبرگ[1] با یک موتور ستاره‌ای رایت که ۹ سیلندر و ۲۰۰ اسب قدرت داشت توانست در ۲۱ ماه مه ۱۹۲۷ برای نخستین بار از روی اقیانوس اطلس پرواز کند. در دوران جنگ دوم جهانی، موتورهای ستاره‌ای تا ۴۲ سیلندر که در ۶ ستاره مرتب شده بودند هم وجود داشتند. موتورهای با سیلندرهای متقابل، موتورهای X و W شکل هم در هواپیماها به‌کار گرفته شدند.

اما حادثه بسیار بزرگ، پس از همهٔ این پیشرفتهای فنی، حذف سریع موتورهای پیستونی برای هواپیماها، با آغاز کاربرد موتورهای واکنشی بود، که بعدها بررسی خواهند شد. پس از سال ۱۹۶۰ موتورهای پیستونی تنها در هلیکوپترها و هواپیماهای توریستی مورد استفاده قرار گرفتند.

موتورهای اتومبیل راه دیگری در پیش داشتند زیرا مشکل اساسی آنها، ایجاد قدرتهای بسیار زیاد نبود. گرایش کلی طبیعتاً افزایش سرعت گردش میل لنگ موتور بود، گرایشی که حتی در نوع تولید انبوه هم وجود داشت. در این زمینه به میانگین از ۵۰۰۰ دور در دقیقه به ۱۰ تا ۱۴ هزار دور در دقیقه برای اتومبیلهای کورسی دست یافتند. در عوض می‌بایست دشواریهای تازه را پشت سر می‌گذاشتند: فرسایش سریع، کمی سوخت‌رسانی، لرزشهای مکانیکی.

گرایش تکمیلی دیگری که بسرعت گسترش یافت: ساختن موتورهای به‌اصطلاح «مربعی» بود. در گذشته نسبت قطر پیستون به طول مسیر حرکت آن همیشه بیشتر از ۱ بوده است. در سالهای ۳۰ این نسبت تقریباً ۱٫۵ بود. پس از ۱۹۵۰ این نسبت عموماً از ۱ کمتر شد و در شماری از اتومبیلها به ۰٫۶۰ رسید. افزایش سرعت گردش میل‌لنگ، دیگر مسبب افزایش سرعت خطی پیستون نبود. در برههٔ ۱۹۵۰ ـ ۱۹۶۰ سرعت گردش موتورهای امریکایی ۲۵٪ افزایش یافت، و حال آنکه سرعت خطی پیستون فقط از ۱۳٫۵ به ۱۲٫۵ متر در ثانیه رسید.

برای افزایش میزان فشار در سیلندرها به تحقیق دربارهٔ انواع تازهٔ محفظهٔ احتراق پرداختند. برای اینکه فشار از ۸ بالاتر رود محفظهٔ احتراق L، که حاصل کارهای ریکاردو بود با سوپاپهای

۱. Lindbergh چارلز اوگاستس ۱۹۰۲ ـ ۱۹۷۴ که در ۱۹۲۷ از نیویورک به پاریس پرواز کرد.

جانبی، دیگر مناسب نبودند و لاجرم محفظه‌های نوع خاردار و از نوع نیمکره‌ای که سوپاپهای آنها در سر سیلندرها جای داشتند مورد استفاده قرار گرفتند. این سیستم عمومیت یافت و سوپاپها تا سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه از شاتون و انگشتی یا بادامک سوپاپ فرمان می‌گرفتند یا برای هر سرعتی، مستقیماً از میل سوپاپ. همهٔ این اصلاحات و نیز دستکاریهای دیگر امکان بالا بردن بسیار زیاد توان ویژهٔ موتور را فراهم ساختند. گرچه در پایان جنگ جهانی دوم قدرت موتورهای هواپیما به ۵۰ اسب برای هر ۱۰۰۰ سانتیمترمکعب رسید، بیست سال بعد، این ارقام به موتورهای اتومبیل مربوط می‌شد و قدرت ۱۰۰ اسب برای هر لیتر، ویژهٔ موتورهای نمایشی بود و حتی قدرت بعضی اتومبیلها به ۶۰ اسب هم رسید.

آرایش حرکتی موتورها زیاد تغییر نکرد، تنها آرایش خطی هشت سیلندر کنار گذاشته شد. آماری از سال ۱۹۶۸ تمایلات مردم را در این دوره نشان می‌دهد: برای موتورهای اتومبیل: ٪۵۳٫۵ دارای سیلندرهای خطی، ٪۳۲٫۵ دارای سیلندرهای خورجینی و ٪۱۴ با سیلندرهای متقابل بود. در مورد تعداد سیلندرها، همین منبع اطلاعات تخمینی زیر را می‌دهد: ٪۴۰٫۵ چهار سیلندر، ٪۲۸٫۵ هشت سیلندر، ٪۲۴٫۵ شش سیلندر، ٪۶٫۵ دو سیلندر و ٪۱ موتورها سه سیلندر داشتند. بالاخره باید توجه داد که موتورهای دوهنگامی که از آغاز این سده کنار گذاشته شده بودند بشدت رواج یافتند؛ همین‌طور موتور ساخت ف. ونکل[1] و موتور با پیستون دورانی که اندیشهٔ آن به پیش از سال ۱۹۰۰ مربوط می‌شد.

طبیعی است که همگام با پیشرفت متالورژی از جهت سبکی وزن و مقاومت، مصالح ساختمانی موتورها هم متحول شود. آلیاژهای آلومینیم و سیلسیم به گستردگی جای چدن معمولی را برای ساختن سیلندرهای موتور و سرسیلندرها گرفتند و چدن گره‌ای (چدن با گرافیت دانه‌ای) جانشین فولاد در میل‌لنگ‌سازی شد و ....

به موازات این تحول، تکنیک‌های پالایش نفت، تولید سوختهای با عدد اوکتان ۱۰۰ و حتی بالاتر از آن را برای اتومبیلهای مسابقه، ممکن ساخت. بالاخره، الکترونیک هم در بهتر کردن بعضی کارها نظیر کنترل تزریق و اشتعال سهیم شد. در سیستمهای ترانزیستوری، کلید قطع و وصل بکلی حذف شد و نوعی ضربانگر مغناطیسی که در توزیع‌کننده جاگذاری می‌شد وظیفهٔ آن را به‌عهده گرفت.

یک مورد فنی سیر شده اما کهنه ناشده: موتورهای پیستوندار بنزینی حدود سال ۱۹۷۰ یک مورد فنی بودند که به‌نظر می‌آمد که دیگر، حتی در دستکاریهای ظاهری هم نمی‌توان انتظار تغییرات بنیادین در آنها داشت. حداقل یک سده است که چنین می‌نماید که این موردی است که تکامل

1. F. Wenkel

آن به پایان رسیده است و همه بخشهای تحول‌پذیر آن تقریباً به‌طور کامل سیر شده‌اند. به یاد داریم، که ماشین بخار نیز در آغاز سدهٔ معاصر به این مرحله رسید. اما در حال حاضر، موتور پیستوندار را در کار اصلی خود، یعنی خودروی تک‌نفری یا خانوادگی، به جانشینی تهدید نمی‌کند. این وسیله مانند دیگر وسایل فنی این سده، نشانهٔ نوعی روش زندگی شده است و بی‌تردید آرزوی همه کسانی است که به علل گوناگون از کمبودهای کم‌وبیش جدی آن رنج می‌برند.

موتور دیزل

تاریخ موتور دیزل بسیار پیچیده است زیرا می‌توان نشان داد که هیچ‌یک از وسایلی که رودلف دیزل به‌کار گرفت متعلق به خود وی نبوده‌اند و پیش از او معاصرانش جداگانه از آنها استفاده کرده بودند، امتیاز بی‌چون‌وچرای دیزل در روش اشتعال سوخت در نتیجهٔ تنها تأثیر حرارت برخاسته از تراکم هواست که سوخت در آن تزریق می‌شود. اما مرز کاربرد اکید این اصل و استفاده از راههایی گوناگون برای ایجاد اشتعال ـ مثلاً اینکه جدار یک محفظهٔ احتراق جداگانه، یا محفظهٔ پیش از احتراق، از بیرون گرم شود ـ هیچ‌گاه روشن نبوده است، بنابراین، گفت‌وگو دربارهٔ موتورهای دیزل و نیم دیزل دهها سال ادامه یافت. سرانجام، گرچه رودلف دیزل با راه‌انداختن موتوری با نام خود، کار را تمام کرد بزودی معلوم شد که اصولی که در آغاز مبنای کار وی بودند و نیز کارهای تحقیقی وی در عمل به جایی نمی‌رسید، به‌طوری‌که ارزش اختراعات ثبت‌شدهٔ وی مورد تردید قرار گرفت.

بهر تقدیر، باید پذیرفت که این موتور بالاخره نام رودلف دیزل را بر خود دارد و از اواسط سدهٔ بیستم یکی از رایجترین موتورهای زمان ماست.

پیدایش موتور دیزل را می‌توان حادثه‌ای، با اهمیت پیدایش موتورهای با تراکم قبلی دانست. از نظر تاریخی این امر در همان خطی از پیشرفتها قرار دارد که درپی آن است که با بالا بردن میزان تراکم، بازده موتور را افزایش دهد. در موتور دیزل این تمایل به جایی رسید که با گرمایی که تنها برخاسته از تراکم هوا بود سوخت مشتعل می‌شد.

پیش نمونه‌ها: از امتیازات موتورهای دیزل، یکی استفاده از مشتقات سنگین تقطیر نفت و ادامهٔ احتراق با فشار ثابت است. حدود بیست سال پیش از آنکه دیزل کار خود را آغاز کند، این خصوصیات در سال ۱۸۷۳ بوسیلهٔ بریتون، که قبلاً دربارهٔ وی سخن رفته است، مورد استفاده قرار گرفت. این عصری بود که همان‌طور که دیده شد، برای موتورهای جدید درونسوز، همه سوختهای محتمل و بویژه هیدروکربنهای سنگین که ارزان قیمت بودند به‌طور سیستماتیک مورد آزمایش قرار

می‌گرفتند.

گرایش اخیر، بویژه پس از ۱۸۸۵ اوج گرفت. برای این کار می‌بایست به سیستمی از تغذیه بیاندیشند که مخلوطی از هوا و سوخت کافی، با مواد کم فرار به‌دست دهد. بنابراین، انواع گوناگونی از «تبخیرکننده‌ها» ساخته شدند. نمونه‌های اولیهٔ آنها نخست بیرون از سیلندرکار گذاشته می‌شدند و شعله‌ای آنها را گرم می‌کرد، کاری که در سال ۱۸۷۷ Société des moteurs انجام داد یا بوسیله گازهای خروجی، که در سال ۱۸۸۹ پریستمان آن را عملی کرد. بعداً آنها را داخل سیلندرها کردند تا در معرض گرمای ناشی از احتراق مخلوط سوختی باشد، کاری که در ۱۸۸۸ دویتس و بعداً کمبل[1] و اکروید ـ استوارت[2] انجام دادند. از تزریق هم استفاده می‌شد، اما این کار در مرحله ورود سوخت و همراه با فشار کم بود. این روش در نقطه مقابل طرزکاری بود که بعدها برای موتورهای دیزل پذیرفته شد. حتی ترکیبهایی از تبخیرکننده و انژکتور به‌کار گرفته شدند. بررسیهایی گوناگونی که برای حل این مسأله انجام گرفت، انگیزه ساخت وسایل گوناگون در مدت زمان کمی بود.

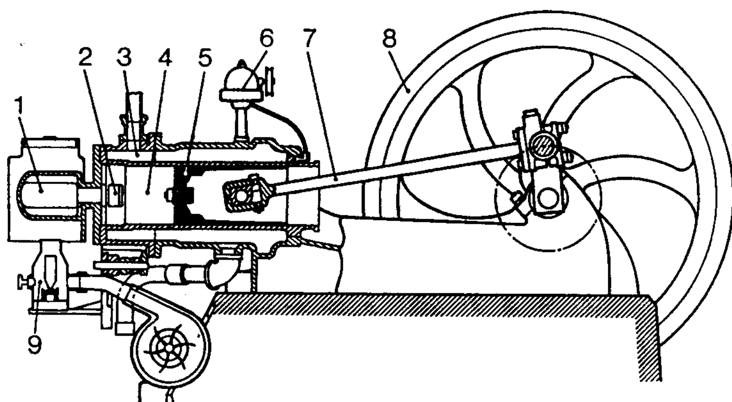
از جمله موتورسازانی که در اواخر سدهٔ نوزدهم درپی استفاده از هیدروکربنهای سنگین در موتورهای احتراقی برآمدند می‌توان از آلمانیها: کاپیتاینه[3]، برادران اشپیل، برادران کورتینگ و از انگلستان: پریتسمان[4] کراسلی، اکروید ـ استوارت، هورنسبای و از فرانسویان: ایل[5]، لواسور، و از امریکاییان: بریتون را نام برد. همهٔ این موتورها بخصوص در برههٔ سالهای ۱۸۸۵ ـ ۱۹۱۰ ساخته شدند و موفقیت آنها چنان بود که در آن هنگام می‌شد پیش‌بینی کرد که آینده از آنهاست.

موتورهای آکروید ـ استوارت: این موتورها در میان همه انواع آنها، چه از نظر کیفیت خاصی که داشتند و چه بدین علت که بعضی از مشخصات آنها به موتورهای دیزل بسیار نزدیک بود و تا امروز هم به چشم اجداد موتورهای دیزل به آنها می‌نگرند، جای خاصی دارند. در واقع این موتورها یک محفظهٔ پیش از احتراق داشتند و با هیدروکربنهای سنگین کار می‌کردند و جالب اینکه آقای آکروید ـ استوارت از همان نخستین ثبت اختراع خود در ۱۸۹۰ پیش‌بینی کرد که این سوخت باید در محفظهٔ پیش از احتراق، در پایان حرکت تراکمی، تزریق شود؛ اصلی که بعدها عملی شد.

موتورهای نخستین آکروید ـ استوارت را شرکت هورنسبای و پسران واقع در گرانثم[6] انگستان ساختند. در این موتورها تزریق سوخت بوسیلهٔ تلمبه‌ای با فشار کم در محفظهٔ پیش از احتراق، اما در حین ورود سوخت انجام می‌گرفت. سوخت تحت تأثیر گرمای احتراق پیشین که جداری از مادهٔ عایق حرارت، آن را نگاهداشته بود، تبخیر می‌شد. بخار سوخت در تماس با جدار داغ محفظهٔ

1. Campbel 2. Ackroyd-Stuart 3. Capitaine 4. Priestmann 5. Hiel

۶. Granthem شهرکی در لینکلن شر، کنار رودخانه ویثم در غرب انگستان.

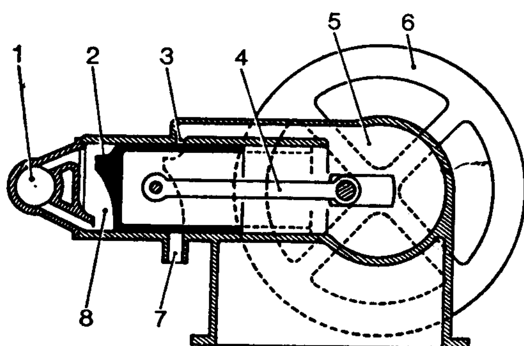


شکل ۸۷.موتور آکروید ـ استوارت (۱۸۹۰).
۱. محفظهٔ پیش احتراق؛ ۲. سوپاپهای ورود هوا و تخلیه؛ ۳. مکانیزم خنک‌سازی با آب؛ ۴. سیلندر؛ ۵. پیستون؛ ۶. وسیلهٔ روغنکاری؛ ۷. شاتون؛ ۸. چرخ طیار؛ ۹. وسیله گرم کردن شعله‌ای محفظهٔ پیش احتراق.

پیش احتراق، زمانی‌که هوای تحت فشار سیلندر به آن وارد می‌شد مشتعل می‌گردید، سپس کار سوخت، در سیلندر به انجام می‌رسید (شکل ۸۷).این موتورها پس از مدت کمی متحول شدند. عمل تزریق در اواخر حرکت تراکمی انجام گرفت. همچنین موتورهایی ساخته شد که بعدها آنها را نیم دیزل نامیدند و عمل اشتعال در آنها بوسیلهٔ «گلولهٔ داغ» محفظهٔ پیش احتراق، انجام می‌گرفت و نه مثل موتور دیزل، تنها تحت تأثیر گرمای ناشی از تراکم هوا در سیلندر. در نیم دیزلها، در واقع میزان تراکم آن‌قدرها بالا نیست که بدون یک منبع حرارتی کمکی ایجاد اشتعال شود. همهٔ این انواع موتورها غالباً با یکدیگر مشتبه می‌شوند و تفاوت چرخه‌های کاری آنها، خوراک جروبحثهای آن دوره بود.

یکی از نخستین موتورهای نیم دیزل دورهٔ نخست که موفقیت درخشانی به‌دست آورد موتور ساخت ف. س. هیرش[1] به سال ۱۸۹۹ بود. دو سال بعد در نخستین کشتی مجهز با موتور درونسوز گذاشته شد و این کشتی اقیانوس اطلس را پشت‌سر گذاشت. موتورهای نیم دیزل دوهنگامی که از موتورهای آکروید ـ استوارت اقتباس شده بودند و در سال ۱۹۰۲ بوسیلهٔ روندولف[2] مهندس سوئدی ساخته شدند تحت نام موتورهای گلولهٔ داغ، موفقیت دراز مدتی به چنگ آوردند (شکل ۸۸).این نوع موتورها بویژه درکشتیهای صیادی، کارگاههای جنگلی یا ساختمانها به‌کارگرفته شدند

1. F. C. Hirsch 2. Rundölf



شکل ۸۸.موتور گلولهٔ داغ روندولف (۱۹۰۲).
۱. گلولهٔ داغ؛ ۲. پیستون؛ ۳. روزنهٔ ورود؛ ۴. شاتون؛ ۵. کارتر؛ ۶. چرخ طیار؛ ۷. روزنهٔ تخلیه؛ ۸. سیلندر.

و تا پایان جنگ دوم جهانی از آنها استفاده می‌شد.

موتور دیزل طرحهای اولیه: رودلف دیزل، مهندس دانشکدهٔ فنی مونیخ، در همان سال ۱۸۸۸ در اندیشهٔ ساختن موتوری بود که بتواند جانشین ماشین بخار شود. وی در آن زمان ۲۲ سال داشت. این موتور ۷۵ سال بعد یکی از جانشینان عمدهٔ ماشین بخار پیستونی شد. این نمایندهٔ شرکت ماشینهای یخسازی در پاریس که از روشهای پروفسور پیشین خود کارل فون لینده استفاده می‌کرد، در آغاز طرح یک موتور آمونیاکی را پیشنهاد کرد و مدل کوچکی از آن را در سال ۱۸۸۷ ساخت.

نفوذ افکار لینده در دیزل در این امر آشکار می‌شود که دیزل نخستین مهندسی بود که برای طرح و محاسبهٔ یک موتور درونسوز به ترمودینامیک روی آورد. هدف وی ساخت نوعی موتور حرارتی بود که بر پایهٔ سیکل کارنو کار کند ـ سیکلی که حداکثر بازده را می‌دهد. دیزل در ۲۳ فوریه ۱۸۹۲ نخستین امتیاز اختراع خود را، که شامل عملی کردن این سیکل با چهار هنگام زیر می‌شد، در آلمان به ثبت رسانید:

۱°، مکش هوا در سیلندر؛

۲°، تراکم، نخست در دمای ثابت (۱) تا حدود ۳ اتمسفر، با تزریق آب برای جلوگیری از بالا رفتن دما، سپس آدیاباتیک (۱) طی بقیهٔ حرکت پیستون تا ۱۲۵۰ اتمسفر در ۸۰۰ درجه؛

۳°، دتانت، نخست در دمای ثابت تا ۹۰ اتمسفر برای تزریق و احتراق سوخت؛ افزایش حجم از بالا رفتن دما جلو می‌گیرد، سپس آدیاباتیک از ۹۰ به یک اتمسفر؛

°۴، تخلیهٔ گازهای سوخته شده که در اثر دتانت تا دمای محیط سرد شده‌اند.

آقای دیزل در سال بعد، طی جزوه‌ای افکار خود را منتشر ساخت اما متأسفانه در آن خطایی راه یافته بود که پیش‌بینی می‌کرد که سیکل شرح داده شده بازدهی بیشتر از سیکل کارنو را ممکن می‌سازد ـ چیزی که ناممکن بود.

آقای دیزل به برکت قراردادهایی که با مؤسسه Maschinenfabrik Augsburg. که بعدها نام آن MAN شد)، متعلق به فریدریک کروپ، مؤسسه سویسی زولتسر امضا کرد توانست در آوگسبورگ[1] در سال ۱۸۹۳ نخستین مدل خود را بسازد، طبق تئوری وی، وسیله‌ای برای خنک‌سازی وجود نداشت، محفظهٔ احتراق در خود پیستون بود و تزریق می‌بایست به‌طور مکانیکی با یک تلمبه انجام گیرد. این موتور کار نکرد و با موتور کمکی یدک شد. این امر به آزمایشها امکان داد تا ثابت کنند که فشار فقط تا ۳۳ اتمسفر بالا می‌رود.

مرحلهٔ دوم تحقیقات: نتیجهٔ ملموس این مرحلهٔ نخست برای دیزل این بود که متوجه شد که سیکل کارنو به‌علت فشار بسیار بالایی که بدان نیازمند است، عملی نیست. وی در ماه نوامبر ۱۸۹۳ به اختراع خود ملحقه‌ای افزود. دومین هنگام سیکل کار، فقط شامل فشار آدیاباتیک هواست و سومین هنگام، شامل احتراقی با فشار ثابت، که یک دتانت آدیاباتیک در اواخر حرکت پیستون به‌دنبال دارد. اشتعال سوخت همیشه به‌علت گرمای برخاسته از فشردگی هوا بود. هنگامهای نخست و چهارم بهتر نشده بودند. هوا فقط تا ۳۰ اتمسفر فشرده شده بود. نام وی با این سیکل تازه بلند آوازه شد.

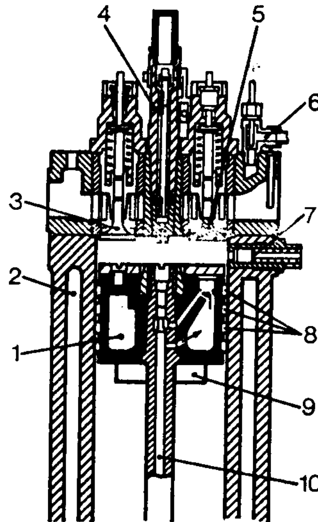
در همین سال علیه افکار دیزل انتقادهای بسیار تندی برخاست، نخست برای اینکه وی عقاید خود را تغییر داده بود، دوم برای اینکه، آن‌طور که گفته می‌شد، هیچ‌کدام از اصول طرح شده از آن وی نبودند. سیکل چهارهنگامی را بو دو روشا طرح کرده و اوتو آن را عملی ساخته بود. تراکم قبلی هوا، به تنهایی و نه مخلوط با سوخت، و پاشیدن سوخت در پایان مسیر را به ترتیب آقایان لاورنس هارگریو، آکروید ـ استوارت و کاپیتاینه مورد استفاده قرار داده بودند. احتراق در فشار ثابت به بریتون برمی‌گشت. حتی اشتعال در اثر گرمای برخاسته از فشار را بو دو روشا در نظر داشت. اوتو کوهلر[2]، مؤسسه دویتس، ا. کاپیتاینه هرکدام جداگانه به امتیاز دیزل که باطل نشده بود نیز چرخه‌ای را شامل می‌شد که هرگز آن را عملی نکرده بود ـ اعتراض کردند.

به‌هرحال، اعتراض علیه تقدم رودلف دیزل هرچه بود، وی توانست موتوری بسازد که سلسله‌جنبان اختراعات و تحولات فراوانی است، کاری که هیچ‌یک از پیشگامان وی که در آن زمان معترض وی

---

۱. Augsbourg شهری در غرب با واریای آلمان، مرکز سوابیا.

2. Otto Köhler



شکل ۸۹.موتور آزمایشی سوم دیزل (۱۸۹۸).
۱. پیستون؛ ۲. مکانیسم خنک‌سازی با آب؛ ۳. سوپاپ ورود؛ ۴. انژکتور سوخت؛ ۵. سوپاپ تخلیه؛ ۶. مکانیسم خنک‌سازی سرسیلندر با آب؛ ۷. سوپاپ اطمینان؛ ۸. رینگ پیستون؛ ۹. مکانیسم روغنکاری؛ ۱۰. شاتون.

شدند بدان دست نیافتند. کار شخصی وی طی دههٔ پایانی سدهٔ نوزدهم تمام شد. در اواخر سال ۱۸۹۳ پیش‌نمونه دیگری طرح شد که در آغاز سال بعد آزمایشهایی روی آن انجام گرفت. این موتور دوم که تغییر شکل یافته بود تا سال ۱۸۹۵ هنوز خدمت می‌کرد. سرانجام دیزل با یاری مانوئل لاوستر[1] نقشه موتور سوم را تهیه کرد. این موتور که در سال ۱۸۹۷ ساخته شد، نخستین موتوری بود که نتایج قطعی داشت (شکل ۸۹).

هرچند که در این دوران سوختهای گوناگون: گازی، بنزینی، گردِ زغال به‌کار گرفته می‌شدند فراورده‌های نفت سنگین به دلایل گوناگون مناسبترین سوخت برای چنین موتورهایی شناخته شد. دشواریهای چندی که در بالا از آنها سخن رفت: شکل و حجم محفظهٔ احتراق، خنک کردن پیستون با جریانی از آب که از شاتون می‌گذشت، وسیلهٔ تزریق سوخت با یک تلمبه هوا، مرتفع شدند. مشکل تزریق یکی از مسائل اساسی مراحل آخر تحقیق بود. حل این مشکل با عمل تزریق به

1. M. Lauster

یاری جریانی از هوا با فشار ۴۰ اتمسفر، یعنی کمی بیشتر از فشار داخلی (۳۰ اتمسفر) انجام گرفت. بیش از ۲۰ سال دیگر باید می‌گذشت تا تزریق مکانیکی با فشار زیاد پذیرفته شود.

روش اشتعال برای مدتی لاینحل ماند. دیزل نیز مانند معاصران خود روشهای گوناگونی را آزمایش کرد: اشتعال با لامپ ملتهب، اشتعال با برق؛ اما در پایان، اشتعال با حرارت برخاسته از فشار بود که یکی از خصیصه‌های بنیادین موتور دیزل شد.

موفقیتهای نخستین: دیزل در برابر خود تنها با مخالفان روبه‌رو نبود؛ مسأله بسیار مهمتر از این بود. مؤسسات متعددی به وی مراجعه کردند و از همان سال ۱۸۹۴ اجازه‌های ساخت اختراعهای وی را خریدند. بعضی از مؤسسات از وی پشتیبانی مالی و فنی کردند. همهٔ کارهای اصلی وی در شهر آوگسبورگ انجام گرفت و تعیین دقیق سهم دیزل و سهم مهندسان مؤسسهٔ MAN در راه‌انداختن و سپس تکمیل این موتور کار بسیار دشواری است.

در مونیخ یک استاد دانشکده فنی با نام موریتیس شروتر از مقام خود برای پیشتیبانی از وی استفاده کرد. او در سال ۱۸۹۷ آزمایشهایی انجام داد که نتایج مطلوب آن مورد تردید نبودند. در فرانسه، صنعتگری با نام فردریک دیکوف[1] از شهر بار ـ لو ـ دوک[2] در فوریهٔ ۱۸۹۷ با موتوری که بر پایهٔ طرحهای دیزل در کارگاه خود ساخته بود نتایج دلخواهی به‌دست آورد. در آغاز همین سال، مدلهای دیگری از این پیش‌نمونه در کارخانهٔ زولتسر واقع در وینترتور، و در کارخانه کروپ در اسن و بالاخره در دویتس مورد آزمایش قرار گرفتند. همکاری مؤسسه اخیر برای انجام یک آزمایش نشانهٔ اعتماد به وی بود و برای دیزل اهمیت شایانی داشت.

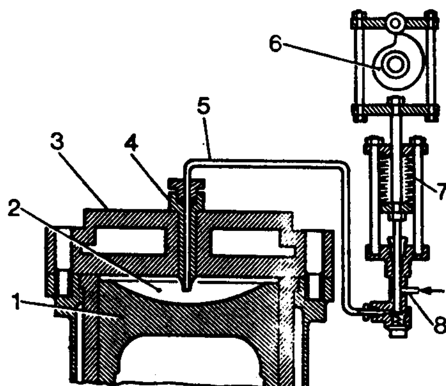
نتایج متفاوتی که به‌دست آمده بودند امیدهای شکوهمندی را نوید می‌دادند. پیش‌نمونه‌ها ایجاد ۱۸٫۳ اسب قدرت در ۱۵۸ دور دقیقه با مصرف ۲۳۴ گرم سوخت برای هر اسب در یک ساعت می‌کردند که بازدهی کاملاً استثنایی ۲۶٫۶٪ بود.

چندی نگذشت که کارخانجات متعددی در کشورهای گوناگون: انگلستان، سوئد، دانمارک، ممالک متحدهٔ امریکا و غیره اجازهٔ ساخت این موتور را از دیزل خریدند. در سال ۱۸۹۸ برای نخستین بار موتورهای دیزل در نمایشگاه مونیخ به نمایش گذاشته شدند.

مرحلهٔ تکمیل: دیزلهای اولیه بازاری، موتورهایی با یک سیلندر عمودی با قدرت ۲۰ تا ۳۰ اسب داشتند. در سال ۱۸۹۷ دیزل یک موتور مرکب دارای سه سیلندر عمودی با ۱۵۰ اسب را آزمایش کرد. اما کار وی دنبال نشد. دو سال بعد، یکی از کارشناسترین آلمانیها به نام هوگو گولدنر نخستین

1. F. Dyckhoff

۲. Bar-le-Duc شهری در شمال‌شرقی فرانسه، مرکز ولایت موز



شکل ۹۰.سیستم تزریق مکانیکی با فشار زیاد، ابداعی مک‌کچنی (۱۹۱۰).
۱. پیستون؛ ۲. محفظهٔ احتراق؛ ۳. سرسیلندر؛ ۴. انژکتور؛ ۵. لولهٔ فشار قوی؛ ۶. مکانیسم فرمان تلمبهٔ تزریق؛ ۷. تلمبهٔ تزریق؛ ۸. لولهٔ فشارکم.

موتور دوهنگامی را، که رواج بسیار گرفت، ساخت.

هرکارخانه اصلاحات مورد نظر خود را روی این موتور عملی کرد. مشکل تزریق باز هم موضوع تحقیقات متعددی بود. روش فشار هوا تا مدتی بی‌رقیب بود. کمپرسور دومرحله‌ای را اولین‌بار کارخانهٔ آلمانی ریدینگر[1] به‌کارگرفت و سبب شد که هوا در فاصلهٔ دو مرحله، خنک و در نتیجه، خطر ترکش بر طرف شود. این کمپرسور فشار هوا را به ۷۰ تا ۸۰ اتمسفر، یعنی دو برابر فشاری که در پایان مرحلهٔ فشار در سیلندر وجود داشت بالا می‌برد. این سیستم، کار پاشیدن سوخت را بخوبی عملی می‌ساخت اما تنها مناسب موتورهای با دورکم بود. در سال ۱۹۱۰ آقای جیمز مک کچنی[2] برای نخستین‌بار تزریق مکانیکی با فشار زیاد ۱۵۰ تا ۴۰۰ اتمسفر را عملی ساخت (شکل ۹۰)،روشی که طی ده سال عمومیت یافت و سرانجام به‌طورکامل جانشین تزریق با فشار هوا شد. در این روش، کشش سوخت بوسیلهٔ جریانی از هوای فشرده، دیگر جایی نداشت و عمل پاشیدن سوخت را تلمبهٔ پیستونداری با فشار زیاد تأمین می‌کرد. بعدها بر همین اساس شمار فراوانی از راه‌حلها پیشنهاد شد که همگی دارای مزایا و معایب مخصوص خود بودند.

این روش تزریق مکانیکی پایه‌ای شد تا در سال ۱۹۳۰ دیزلهای با دور زیاد ساخته شوند و کاربرد آنها به مقیاس زیاد در دهه‌های بعد رواج گرفت. اما این امر به تنهایی برای ایجاد جهشی که

1. Riedinger 2. J. Mckechnie

در این صنعت پدید آمد کافی نبود و لااقل دو مسأله دیگر می‌بایست در همان زمان مورد بررسی قرار گرفته باشند: مسألهٔ محفظهٔ احتراق و مسألهٔ چرخه کار. از زمانی‌که آکروید ـ استوارت محفظهٔ احتراقی طرح کرد که با یک روزنه به سیلندر راه دارد»، شکل و ترتیب این محفظه تا امروز هم پیوسته مورد بررسی و تحقیق است. کار پاشیدن کامل سوخت در حجم معینی از هوا و اشتعال آمیزه و ادامهٔ احتراق همچنین چند پدیدهٔ دیگر می‌بایست با بهترین نظم و بیشترین بازده تأمین شوند و بدین جهت راه‌حلهای پیشنهادی نیز بسیار بودند. محفظهٔ جداگانه تنها مقوله‌ای بود که به انواع متعددی تقسیم می‌شد: محفظه‌های پیش از احتراق، محفظه‌های پر آشوب و محفظه‌های ذخیرهٔ هوا، که هر یک از نوعی درک شرایط تحقق و وسایل انجام کار نشأت می‌گرفتند. می‌بایست به یادآورد که این تعداد تحقیق که پیوسته به راههای گوناگون انجام می‌گرفتند در مسیر یک تئوری کلی نبود و به‌علت اهمیت بالای مسائلی که باید حل می‌شدند آنها را نمی‌شد با روشهای ریاضی، در کل، حل کرد. در حقیقت نوعی فرآیند تجربی و غالباً اختیاری بر این پژوهشهای مینیاتوری فرمان می‌راند و بنابراین راه‌حلها، بی‌شمار بودند.

کار در آغاز، همان‌طورکه دیدیم، مربوط به احتراق در فشار ثابت می‌شد، اما بزودی به‌سوی نوعی چرخه «مختلط» گرایش یافت که ترکیبی از موتور بنزینی، با احتراق در حجم ثابت و مخصوص دیزل بود که احتراق در آن با فشار ثابت انجام می‌گرفت. حدود سال ۱۹۰۹ بود که آقای ساباته[1]، مهندس فرانسوی به مزایای مختلط پی‌برد و راه عملی کردن آن را یافت ـ کاری که با دو مرحله‌ای کردن تزریق سوخت انجام‌پذیر بود: احتراق بخشی از سوخت در حجم ثابت، سپس تزریق بخش دیگر سوخت در سیلندر که با فشار ثابت محترق می‌شود.

باز در همین دوران بود که تزریق با فشار هوا، که تنها راه کار بود، تا توالی این دو مرحله منظم باشد با دشواریهای زیادی مواجه شد. تنها پس از گذشت ۱۵ یا ۲۰ سال یعنی، زمانی‌که برتری چرخهٔ ساباته کاملاً پذیرفته شد و این، مدل کار موتورهای دیزل با دور زیاد شد، تزریق مکانیکی به‌کار گرفته شد.

از بازده حرارتی ۳۵ تا ۴۰٪ و میانگین فشار مؤثر ۶ تا ۷/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، بدون افزایش فشار هوا،تنها با استفاده از موتورهای توربینی با افزایش فشار یا از موتورهای پیستونداری که با توربو ماشین مزدوج بودند به مرزهای بالاتر دست یافتند.

با وجود سادگی آشکار دیزل، لااقل در تئوری، از همان ساعتهای نخست، سازندگان این نوع موتور با دشواریهای بسیار پیچیده‌ای روبه‌رو شدند که کار تزریق، محفظهٔ احتراق ، چرخه کار، باز در

1. Sabaté

صف نخست مشکلات بودند. در مراحل مختلف پیشرفت راه‌حل گوناگونی که به‌کارگرفته می‌شدند بافته‌ای از مزایا و معایبی بودند که غالباً از راه تجربه برطرف می‌شدند.

کاربردها: از همان سالهای نخستین انتظار می‌رفت که رواج موتور دیزل باید بسیار سریع باشد. دو کاربرد اصلی این نوع موتور، کار ثابت در کارخانه‌ها و حرکت دادن کشتیها بود.

نخستین موتور دیزل صنعتی در سال ۱۸۹۸ در کارخانهٔ کبریت‌سازی کمپتن[1] واقع در باویر به‌کارگرفته شد. این اولین دیزل دو سیلندری بود که ۶۰ اسب قدرت و ۱۸۰ دور در دقیقه داشت. این موتور که در MAN ساخته شده بود با نام موتور کمپتن شناخته می‌شد. چند سال بعد، موتور دیزل ظاهراً ویژهٔ مولدهای برق شد. نیروگاه برق تراموای شهر کیف، نخستین جایی بود که با موتورهای دیزل مجهز شد و در برههٔ سالهای ۱۹۰۳ـ۱۹۰۶ شش دیزل ۴۰۰ اسبی با ۱۶۰ دور در دقیقه در آنجا کارگذاشته شدند.

در سال ۱۹۰۳ بازهم، یک قایق بادبانی مشهور به *Petit-Pierre* با دیزلی دارای پیستونهای متقابل با قدرت ۲۵ اسب و ۳۶۰ دور در دقیقه، ساخت کارخانهٔ سوترـ هارله مجهز شد. در همین دوران و در سالهای پس از آن کشتیهای دیگری در سوئد، روسیه، سویس و کشورهای دیگر با موتور دیزل حرکت می‌کردند. در فرانسه، نیروی دریایی بخصوص برای زیردریاییهای خود علاقه‌مند به موتور دیزل شد. در همان سال ۱۹۰۳ کارخانهٔ سوترـ هارله برای زیردریایی اسرارآمیز Z دیزلی ساخت و در ۱۹۰۴ برای گروه زیردریاییهای *pierres précieuses* سفارشی دریافت داشت. سپس در سال ۱۹۰۷ نوبت *Mariotte* با یک دیزل ۷۰۰ اسبی شد. کارخانه‌مان در همان سال برای زیردریاییهای فرانسه موتورهای دیزل تولید کرد و حال آنکه آلمان تا سال ۱۹۱۲ زیردریایی دیزلی نداشت. در همان سال کارخانهٔ دانمارکی بورمایسترـ واین[2] یک دیزل هشت سیلندری با قدرت ۱۰۰۰ اسب و ۱۴۰ دور در دقیقه برای کشتی بزرگ تجارتی *Sealandia* که به آسیا رفت‌وآمد داشت ساخت و این موتور شهرت بسیار به‌هم رسانید.

بااین‌حال، از سال ۱۹۰۰ در ساخت موتورهای دیزل رکوردی حاصل شد. گرچه کارخانه‌های زیادی اجازه و ساخت این موتورها را خریدند، بیشتر آنها قدرت فائق آمدن بر مشکلات راه‌اندازی چنین موتوری را که هنوز کار آن با پیشامدهای زیادی همراه بود، نداشتند. وانگهی، رواج موتور دیزل با تجهیزات صنعتی و مهم ماشینهای بخار، که به کمال خود دست یافته بودند و نیز با رواج بسیار پیشرس توربینهای بخار همزمان شد. تنها در پرتو پشتکار کارخانه‌داران بسیار هوشمندمان، زولتسر، سوترـ هارله بود که دیزل توانست طی چند سال این شروع بسیار بد را پشت‌سر گذارد. کارخانهٔ‌مان

1. Kempten 2. Burmeister-Wain

پس از موفقیتهایی که به‌دست آورد در سال ۱۹۰۸ برای همیشه ساخت ماشینهای بخار را ـ که بهترین تولید آن بود به کناری گذاشت و یکسره به تولید موتورهای دیزلی روی آورد. وانگهی امتیاز دیزل در همان سال از میان رفت. بدین‌ترتیب ساخت این موتور با جدیت بیشتری انجام گرفت و تلاشهای فنی برای افزایش ویژگیهای آن چندین برابر شد. قدرت این موتور از ۳۰ اسب در سال ۱۹۰۰ به ۱۰۰۰ اسب در حدود سال ۱۹۱۰ رسید. عصر ساخت دیزلهای غول‌آسایی با دو هنگام برای کارکردن در کشتیها فرارسیده بود.

در سال ۱۹۱۰ اندیشه کاربرد موتور دیزل در راه‌آهن مطرح شد. نخستین لوکوموتیو دیزلی را شرکت کلوزه ـ زولتسر[1] در سال ۱۹۱۲ به راه انداخت. اما دیزل برای این کار، تا پایان سالهای ۳۰ آمادگی نداشت.

جنگ جهانی اول تأثیر خوبی روی گسترش ساخت دیزل داشت، گرچه اثر آن روی موتورهای بنزینی بیشتر بود. بویژه در آلمان تجهیز زیردرياییها با دیزل اغواکننده بود. کارخانهٔمان دیزلهایی با ده سیلندر می‌ساخت که چهارهنگامی بودند و ۱۳۰۰۰ اسب قدرت و ۳۹۰ دور در دقیقه داشتند و کارخانهٔ کروپ دیزلهایی برای زیردریایی می‌ساخت که شش سیلندر داشتند، دوهنگامی بودند با قدرت ۱۶۵۰ اسب و ۳۵۰ دور در دقیقه.

این نیازها با توسعهٔ نیروی دریایی وکشتیهای باری، پس از پایان گرفتن مخاصمات پدید آمدند و صنعت ساخت موتورهای دیزل رونق جهانی فراوان یافت.

این زمانی‌که تزریق مکانیکی، راه را برای موتورهای سریع گشوده بود، موتورهایی که همراه با موتورهای کند سنتی میدان کاربرد دیزل را توسعه دادند.

باز باید گفت که این زمانی بود که روش افزایش فشار، که در سال ۱۹۱۱ برادران زولتسر آن را اجرا می‌کردند معمول شده بود. با اینکه در موتورهای احتراقی، این روش به‌علت خطر ایجاد انفجار، محدود شده بود در دیزل، تنها به بهبود احتراق کمک می‌کرد. بدین‌دلیل افزایش فشار نخست در موتورهای دیزل با قدرت بسیار زیاد، و سپس در بقیهٔ آنها عمومیت یافت. در سالهای ۳۰ این کار سبب افزایش قدرت موتور دیزل، حداکثر تا ۶۰٪ بود. این افزایش در روزگار ما به ۲۰۰٪ رسیده است. این کار سبب می‌شود که میانگین فشار مؤثر از رقم حداکثر هشت کیلوگرم بر سانتیمترمربع در دیزلهای بدون افزایش فشار به‌حدود رقم ۲۰ کیلوگرم و حتی بیشتر در دیزلهای با افزایش فشار برسد. بازده حرارتی هم تا ۴۵٪ بالا رفته است.

موتورهای دیزل کند، که سرعت گردش آنها حداکثر ۱۲۰۰ دور در دقیقه است برای قدرتهای

1. Klose-Sulzer

بسیار بالا به‌کار گرفته شدند. اگر در دوران جنگ جهانی نخست، قدرت قویترین موتورها حدود ۳۰۰۰ اسب بود در حدود سال ۱۹۳۰ به ۱۵۰۰۰ اسب و در روزگار ما به ۳۰۰۰۰ اسب (با ۳۰۰۰ اسب برای هر سیلندر) افزایش یافته است. در سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۳۰ موتورهای چهار هنگامی دوطرفه (مثلاً: بورمایستر ـ واین با ۱۰۰۰۰ اسب در ۱۹۲۴) و موتورهای دوهنگامی یکطرفه با روبش طولی (مثلاً، زولتسر ۱۳۰۰۰ اسب در ۱۹۲۴) برای کشتی *Aorangi* ساخته شدند. در دههٔ پس از آن، موتورهای چهارهنگامی دوطرفه به‌علت دشواری ساخت کنار گذاشته شدند و به ساخت موتورهای چهارهنگامی یکطرفه دارای افزایش فشار روی آوردند.

در همان زمان موتورهای دوهنگامی یکطرفه، دوطرفه با پیستونهای متقابل عرصه را تصاحب کردند. پس از جنگ جهانی دوم، موتورهای دیزل بسیار قدرتمند (با دور بسیار کم ۵۰۰ دور در دقیقه) عنوان موتورهای دوهنگامی را در انحصار خود گرفتند. اکنون این موتورها در رقابت تنگاتنگی با توربینهای بخاری و گازی هستند.

با پیشرفت موتورهای با دور زیاد، میدان کاربرد دیزل در آغاز سالهای ۱۹۳۰ شامل هواپیماها، اتومبیلها و راه‌آهن شد. در مورد موتورهای دیزلی هواپیما باید گفت که پیش از جنگ جهانی دوم و در سالهای نخستین مخاصمات مدت نسبتاً کوتاهی رواج داشت. بویژه کارخانهٔ یونکرس به ساخت دیزلهای دوهنگامی با پیستونهای متقابل برای هواپیمای بمب‌افکن آلمان می‌پرداخت. اما این دیزلها به‌علت برتری موتورهای بنزینی و کمی بعد موتورهای واکنشی در هواپیماها کنار گذاشته شدند.

در رشتهٔ حمل‌ونقل زمینی، وضع به‌گونه‌ای دیگر بود. در سال ۱۹۲۰ آقایان ارنست ـ فرای[1] و کارل فیشر، موتور دیزلی را روی موتورسیکلتی سوار کردند. این موتور که هفت اسب قدرت داشت و در هر دقیقه ۲۴۰۰ دور می‌گردید بی‌شبهه نخستین «دوچرخهٔ» دیزلی بود. در همان زمان در فرانسه آقای تارتره[2] دیزل سبکی را که سرعت زیاد داشت برای پژویی که در مسابقهٔ اتومبیلرانی پاریس ـ بوردو شرکت می‌کرد طراحی نمود. در سالهای پس از آن سازگار کردن دیزل با راهپیماها پیشرفت کرد. نخست وزنهای سنگین، تراکتورها، اتوبوسها، وسایل ساختمانی و ماشینهای جنگی بودند که بتدریج با موتورهای دیزل مجهز شدند. این گرایش در سالهای ۱۹۳۰ قوت گرفت و پس از جنگ جهانی دوم در سالهای ۹۵۰ به حوزهٔ اتومبیلهای شخصی نیز نفوذ کرد.

«دیزلی کردن» راه‌آهن، گسترشی آهسته داشت. یک مشکل اصلی این کار، گزینش طرز ارتباط محور راه‌انداز یا اصلی به محورهای کشنده به تناسب قدرت دیزل، یعنی به تناسب نوع لکوموتیو و نیز سرویس مورد نظر آن بود. ارتباط مکانیکی مناسب قدرتهای کم بود و در این زمینه

1. E. Frey 2. Tartrais

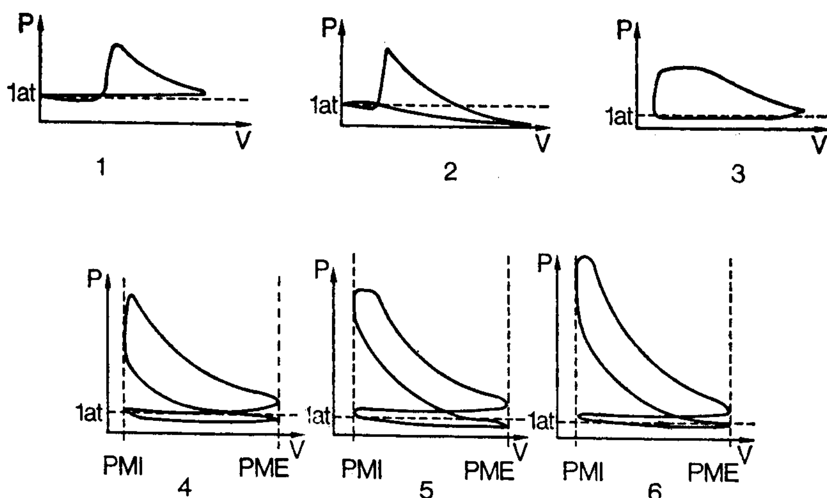
مزایای سبکتر و نیز ارزانتر بودن از سیستمهای دیگر مدنظر بودند. این روش می‌بایست برای اتوریلها تطبیق داده می‌شد. ارتباط هیدرولیکی خود را مناسب قدرتهای متوسط نشان داد و بری تجهیز تراکتورهای سرویس مفید بود. اما تنها ارتباط الکتریکی، مناسب لوکوموتیوهایی است که برای کشیدن واگونهای مسافری یا کالا به‌کار گرفته می‌شوند. این نوع ارتباط علاوه بر دیگر مزایا دارای فرمان بسیار راحت‌تری برای تغییر قدرت و سرعت است. موتور دیزل با این نوع ارتباط مولدی به‌همراه دارد که موتورهای برقی روی محور کشنده را تغذیه می‌کند.

نخستین لوکوموتیو دیزلی برقی در سال ۱۹۲۸ در انگلستان ساخته شده، پس از آن در ۱۹۳۲ در آلمان و در ۱۹۳۴ در ممالک متحده امریکا. در همین مملکت بود که دیزلی کردن در آغاز سالهای ۱۹۴۰ به‌طور سیستماتیک دنبال شد. حذف لوکوموتیو بخاری از اوایل سالهای ۱۹۶۰ سرعت گرفت. در اروپا، درکشورهایی که پارکهای لوکوموتیوهای پارک‌شده در جریان جنگ جهانی دوم متحمل تلفات سنگین شدند موتورهای دیزل در شبکه‌هایی که برای برقی شدن ساخته نشده بودند بسرعت جای لوکوموتیوهای بخاری را گرفتند.

در پایان مقالهٔ مربوط به موتورهای درونسوز پیستوندار، می‌توان پیشرفت اعجاب‌انگیزی را که این وسیلهٔ تولید انرژی طی یک سده داشته است با نگاه به نمودارهای مربوط به چرخه‌های موتورهای گوناگون و با به یاد آوردن مقادیر بازدهٔ حرارتی مرورکرد. بازدهٔ موتور لنوار سال ۱۸۶۰ فقط ۴٫۶٪ بود، اما امروز به بازده ۲۵٪ برای موتورهای احتراقی خودروها و ۲۹٪ برای همین‌موتورها درحالی‌که با توربینهای گازی انفجاری مزدوج شده‌اند رسیده‌ایم و بازده ۴۰٪ را برای موتورهای دیزل فاقد افزایش فشار و ۴۵٪ را برای موتورهای دیزل با افزایش فشار داریم (شکل ۹۱).

توربینهای گازی و موتورهای واکنشی

ازجمله چیزهایی که در اواخر سدهٔ نوزدهم در رشته کاربرد بخار آب به‌عنوان شارهٔ حرکت‌دهنده در موتور دارای روتور به‌دست آمد، اصل احتراق درون ظرفی سربسته و انبساط گازهای سوخته شده بود که در نیمهٔ نخست سده بیستم در توربینها مورد استفاده قرارگرفت. جریان تکاملی اندیشه‌ای که بدین اختراع انجامید بخوبی قابل درک است و ادامه آن به اختراع توربینهای بخارکشیده شد. این توربینها با به‌کارگرفتن روتورهای پره‌دار در توربینهای آبی و تعویض یک کار فنی انبساط بخار، که از مدتها پیش در ماشینهای پیستونی از آن استفاده می‌شد با کار فنی دیگری که آن نیزکلاسیک شده بود؛ یعنی ضربهٔ جریان آب روی پرگان، ساخته شدند. توربین گازی نیز نتیجهٔ انتقال یک کار



شکل ۹۱.نمایه‌های چرخه‌های گوناگون موتورهای پیستونی.
PMI: نقطهٔ مرگ داخلی؛ PME: نقطهٔ مرگ خارجی.
۱. چرخهٔ موتور دوهنگامی دوطرفه و بدون تراکم اولیه (لنوار، ۱۸۶۰)؛ ۲. چرخهٔ موتوراتمسفری (اوتو ـ لانگن، ۱۸۶۷)؛ ۳. چرخهٔ موتور دوهنگامی با تراکم قبلی در بیرون سیلندر، احتراق در فشار ثابت (چرخه بریتون)؛ ۴. چرخهٔ چهارهنگامی با انفجار (چرخه اوتو ـ بو دو روشا، احتراق در حجم ثابت)؛ ۵. چرخه موتور دیزل (چرخه دیزل با احتراق در فشار ثابت)؛ ۶. چرخه موتور سریع دیزل (چرخه ساباته با احتراق مختلط)

فنی، از موتورهای بنزینی یا دیزلی به شرایط کاری دیگر، نه روی جبههٔ پیستون بلکه روی نیمرخهای پره‌های موجود در یک محور گردان بود.

تنها می‌توان گفت که اختراع توربینهای گازی در اصل از توربینهای بخار الهام گرفته شده است زیرا آن‌طور که خواهیم دید نخستین طرحهای مربوط بدان همزمان با طرحهای مربوط به توربینهای بخار بوده‌اند. بااین‌حال تردیدی نیست که موفقیتهای سریع توربینهای بخار بود که بمحض اینکه کاربرد احتراق درونی در موتورهای پیستونی به‌طور کامل حاصل شد، یعنی طی سالیان نخستین سده بیستم، راه را برای پیشرفت توربینهای گازی گشود.

با این‌همه ، اختراع و پیشرفت توربین گازی با جریان پیشرفت همردیف بخاری خود تفاوتهای جدی دارد. مراحل نوآوری آن بسیار طولانیتر بوده است زیرا موتورهای اولیه قابل استفاده تا اواخر سالهای ۱۹۳۰ در دسترس نبودند. وانگهی برای اینکه کاربرد توربینهای گازی پیامدهای فنی قطعی داشته باشد دو یا سه دهه گذشت زمان لازم بود و این پیامدها جز در یک زمینه، در

هواپیماهای جنگی و هواپیماهای حمل‌ونقل، به‌طور جهشی پدید نیامدند. در این هواپیماها، همین‌که توربو رآکتورها رواج یافتند موتورهای پیستونی کنار گذاشته شدند.

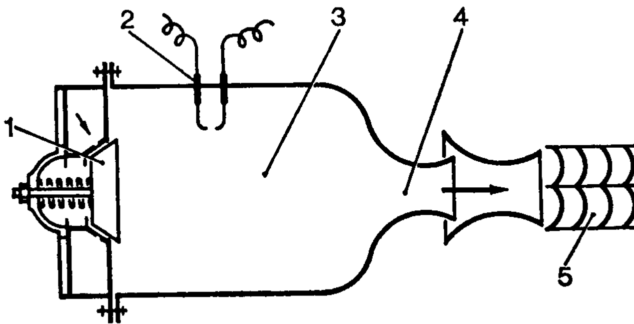
سرانجام، توربینهای گازی لااقل در مراحل پایانی پیشرفت، درکانون یک جنبش پژوهشی برای استفادهٔ هرچه بیشتر از اصل احتراق درونی هستند. این امر نخست در کاربرد گازهای فراری از توربین برای فعال کردن کمپرسورهای مخصوص افزایش فشار موتورهای پیستونی تحقق یافت و بدین‌ترتیب چرخه‌های دتانت مدید میسر گردید. بعدها این کوششها برای سازگارکردن نوع خاصی دیزل، موتور پیستون آزاد، با کار گازسازها برای توربین دنبال شد و پس از مدت زمانی طولانی، از یکسو برای ساختن توربو پروپولسورها و توربو رآکتورهای مخصوص هواپیما، و از سوی دیگر در نهایت برای حذف توربین در نوع خاصی از رآکتور، رآکتورهای استاتیک و پولسورآکتورها که در آنها تراکم لازم هوا برای احتراق بر اثر سرعت زیاد جابه‌جایی موتورها در هوا حاصل می‌شود، ادامه یافت.

مراحل اولیهٔ توربینهای گازی: رسم شده است که ثبت اختراع آقای جان باربر در سال ۱۷۹۱ را نخستین پیدایی اندیشه‌های مربوط به توربینها به‌شمار آورند. در این سند دربارهٔ هدایت گازها از یک محفظهٔ سوخت به‌سوی یک چرخ پره‌دار سخن رفته است. اما طبیعی است که این طرح عملی نشد. طرح آقای بوردن، که در سال ۱۸۲۴ مبتکر توربینهای آبی بود بسیار روشنتر است. وی در سال ۱۸۴۷ ساخت یک «توربین با باد گرم و دارای چندین روتور را، که از یک ردیف دمهای مرتبط با یکدیگر به‌عنوان کمپرسور استفاده می‌کرد» پیشنهاد نمود.

سرانجام نخستین امتیازی که واقعاً در رابطه با توربینهای گازی به ثبت رسید از آنِ لاوال سوئدی در سال ۱۸۹۳ بود. وی طرز کار توربین بخاری کنشی را، به توربینی از همان نوع که با گازهای سوخته شده در یک محفظهٔ احتراق کار می‌کرد انتقال داد. همان‌طورکه درگذشته دیده شد، دهانهٔ دتانت، گازها را به‌طرف پرگان توربین هدایت می‌کرد. اما در این نوشته از کمپرسور هوا و تزریق سوخت مایع چیزی دیده نمی‌شود.

در سال ۱۸۹۹ اشتولتسه[1] آلمانی طرح روشنتری داد. توربین با گازهای سوختی، براساس شرح وی شامل یک کمپرسور مرکزگریز است که مستقیماً روی خود محور توربین نصب شده است. یک نمونهٔ آزمایشی از آن در سال ۱۹۰۴ ساخته شد اما دنبالهٔ آن را نگرفتند. باید گفت که پیشرفت توربینهای گازی در حدود نیمهٔ سدهٔ بیستم برپایهٔ طرح اشتولتسه بوده است.

1. Stolze



شکل ۹۲.توربین گازی «انفجاری» آرمنگو (۱۹۰۳).
۱. سوپاپ ورود مخلوط سوخت؛ ۲. مکانیسم اشتعال برقی؛ ۳. محفظهٔ احتراق؛ ۴. دهانهٔ خروج گاز؛ ۵. توربین.

محفظهٔ احتراق «انفجاری»: در همان زمان طرح دیگری برای ساختن توربینهای گازی اقبال زیادی یافت. در سیستمی که در بالا ذکر آن رفت گازها از سوختی که به‌طور پیوسته، با فشار ثابت در محفظه‌ای که با کمپرسورها تغذیه می‌شد انجام می‌گرفت تأمین می‌شدند. طرح دیگری هم بود که بیشتر از روش احتراقی استفاده می‌کرد که در موتورهای به‌اصطلاح انفجاری عملی می‌شد. محفظهٔ احتراق دارای یک سوپاپ ورود سوخت بود و یک شمع الکتریکی متناوباً آن را مشتعل می‌ساخت ـ کاری که در موتورهای پیستونی انجام می‌گیرد. عمل احتراق در حجم ثابت و فشار فوق‌العاده زیاد است؛ گازهای سوخته شده به‌جای اینکه در مرحلهٔ دتانت روی جبههٔ پیستون فشار آورند، از دهانه شیپوره به‌سوی پره‌های توربین پرتاب می‌شوند.

نخستین نوشته‌ها در این مورد، تاریخ ۱۸۹۰ را دارند و تعداد آنها در شروع سدهٔ بیستم بسیار زیاد شد. همهٔ اختراعات ثبت شده تغذیهٔ محفظهٔ سوخت را از راه مکش و در فشار جوّ ـ درست مانند نخستین موتورهای گازی بدون تراکم قبلی ـ توصیه می‌کنند. آقای آرمنگو، مهندس فرانسوی، نخستین توربین از این نوع را در سال ۱۹۰۳ درکنگره مکانیسین‌ها در لیژ نمایش داد (شکل ۹۲).

هرچند که نمونه‌های دیگری از این دست ساخته شدند. اما بزودی از رواج، افتادند. بازده آنها بسیار پایین بود و پس از مدت زمان کمی، بدین نتیجه رسیدند که قبل از ورود مخلوط سوختی در محفظه، آن را تحت فشار قرار دهند. آقای هـ. هولتس‌وارت[1]، مهندس آلمانی، که در سال ۱۹۰۸

1. Holzwarth H.

مطالعهٔ مسألهٔ توربینهای گازی را شروع کرد، نخستین کسی بود که از همان سال ۱۹۰۹ این نوع تغذیه را مطرح ساخته است. وی از کمپرسورهای توربینی، که در آن زمان برای تزریق پنوماتیکی در دیزلها زیاد به‌کار می‌رفتند استفاده کرد. برای اینکه اثر ناپیوسته بودن اشتعال متناوب را کم کند آقای هولتس‌وارت در سال ۱۹۱۰ تعداد محفظه‌های احتراق یک توربین را تا ده عدد بالا برد، بدین طریق اشتعال در فواصل زمانی کوتاهی از یک محفظه به دیگری منتقل می‌شد.

در طی سالهای پس از آن هولتس‌وارت رفته‌رفته جزئیات بسیاری از توربینهای خود را که آقای تیسن[1] در مولهایم[2] می‌ساخت تا سال ۱۹۳۴ تکمیل کرد: «جانشین کردن توربین بخار با یک موتور برقی برای فعال کردن کمپرسور، کاربرد دوبارهٔ جریان خنک‌کنندهٔ آب برای اطاق احتراق این توربین، افزایش میزان فشار تا ۳٫۵ اتمسفر، سنبه ماتریسکاری پره‌ها از فولاد بسیار نرم. در همین زمان توربینهای دیگری هم ساخته شدند که یکی از از آنها از براون ـ باوری ساخت سال ۱۹۲۸ بود که کمپرسوری هوای با فشار زیاد را وارد کورهٔ دیگ بخار می‌کرد؛ و گازهای مربوط به احتراق این کوره، توربین را می‌گردانیدند.

سرانجام این نوع توربین که معایب فراوان داشت در اواخر سالهای ۴۰ کنار گذاشته شد،

محفظه‌های احتراق پیوسته: در زمان حاضر همان طرح اولیه محفظه‌های احتراق پیوسته با مخلوطی از سوخت که با فشار وارد شود مورد توجه قرار گرفته است.

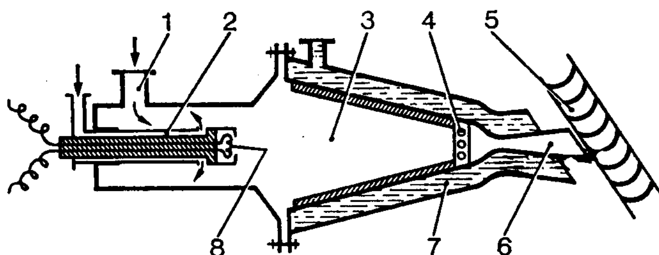
هنگامی‌که آقای اشتولتسه کارهای اولیه را در این زمینه انجام می‌داد، شرکت فرانسوی توربو موتورسازی برادران آرمنگو و شارل لومال[3] برای راه انداختن چنین توربینی می‌کوشند (شکل ۹۳). ساخت این توربین بسیار دشوار بود زیرا با آنکه در سال ۱۹۰۱، زمان ثبت اختراع لومال، ساخت آن آغاز شد حدود سی سال، تقریباً به کناری گذاشته شد. اصول ساخت این دستگاهها عیبی نداشتند: کمپرسور مرکزگریز چند مرحله‌ای، محفظهٔ احتراق که بخشی از آن با مواد نسوز ساخته می‌شد و بقیه از ورقهای فولاد که با آب خنک می‌شدند، داخل محفظه را بخار آب خنک می‌کرد و این عمل اثر دتانت مخلوط گازها را افزایش می‌داد، توربین کنشی (ضربه‌ای) یا دارای مراحل سرعت (رجوع کنید به شکل ۹۴). اما وسایل ساخت، ناقص و بازده تقریباً صفر بود و قدرتی که به‌دست می‌آمد به دشواری بیش از مقداری بود که کمپرسور دریافت کرده بود.

در اواخر سالهای ۳۰ وسایل فنی موجود در حدی بود که با آنها آغاز برطرف کردن دشواریها

۱. Thyssen فریتس (۱۸۷۵ ـ ۱۹۵۱) صنعتگر آلمانی که کارخانه بزرگ آهن و فولاد به ارث به وی رسید. برای روی کار آمدن نازیسم و هیتلر، سخاوتمندانه کمکهایی مالی کرد و در اوایل رژیم نازیها، فرمانروای اقتصاد آنها شد.

۲. Mulheim شهری در آلمان غربی، در وستفالی شمالی

3. Ch. Lemale



شکل ۹۳.توربین گازی «احتراقی» آرمنگو ـ لومال (۱۹۰۱).
۱. ورود هوای فشرده؛ ۲. تزریق سوخت؛ ۳. محفظهٔ احتراق؛ ۴. سوراخهای ورود آب در محفظهٔ احتراق؛ ۵. توربین؛ ۶. شیپورهٔ پرتاب؛ ۷. جریان آب خنک‌کننده؛ ۸. مکانیزم اشتعال با برق

ممکن می‌نمود. کار توربینها، پیشرفت دانش مکانیک سیالات را در این زمینه امکان‌پذیر می‌ساخت. وانگهی، رشته متالورژی هم مواد خام مقاوم در برابر دماهای بسیار بالای گازها را که برای به‌دست آوردن بازده مطلوب لازم بود، تأمین کرده بود. سرانجام باید گفت که در آغاز جنگ جهانی دوم، تحقیقات برای تکمیل توربو رآکتورهای هواپیمایی بسیار پیشرفته بود.

بدین‌ترتیب طی لااقل ۲۰ سال، توربینهای گازی با احتراق پیوسته، به‌طور جدی در صنعت به‌کار گرفته شدند.

کمپرسورهای مرکزگریز، به‌طورکلی پس از سال ۱۹۵۰ به سود کمپرسورهای محوری که بازده و فشار هوای بیشتر داشتند از رده خارج شدند. پره‌های کمپرسورهای محوری، هوا را در جهت موازی با محور موتور می‌راندند، و این تقلیدی از جریان آب در توربینهای کاپلان بود. با این‌همه، کمپرسورهای مرکز گریز که ارزانتر بودند بکلی حذف نشدند. از پیشرفتهای بزرگی که در بخش محفظهٔ احتراق و آماده‌سازی سوختها انجام گرفت می‌توان از کاربرد نفت چراغ یا کروزن نام برد که بدین‌ترتیب، نشست خاکستر سوخت روی پره‌ها از میان رفت.

نوع توربینهای واکنشی، که بازدهٔ آنها بیشتر از نوع کنشی است، بالاخره در همان دوره پذیرفته شد و بویژه ساختن آنها با مواد مخصوص همراه با مکانیسم تکمیل‌شدهٔ خنک‌سازی افزایش دمای گازها را هنگام ورود به توربین هواپیما، مثلاً از ۷۰۰ درجه در حدود سال ۱۹۴۵ به ۱۲۰۰ درجه در سال ۱۹۶۵ ممکن ساخت. موادی که برای نیل به چنین پیشرفتی در اختیار داشتند عبارت بودند از: فولادهای فریتی و اوستنیتی. مثلاً آلیاژ mimonic ۸۰ دارای ۷۵٪ نیکل، ۲۰٪ کروم

و تنها ۵٪ آهن بود. مواد سرامیکی هم برای پوشاندن قطعات فلزی یک لایهٔ حفاظتی و هم برای ساخت پره‌ها از سرامیک، بهتر شدند.

خنک‌سازی با هوای فشرده یا آب، بهتر شدن بازده با استفاده از رکوپراتورهای گرما، تحقیق و محاسبهٔ ریاضی چرخهٔ کار را نیز می‌توان از عوامل اصلی این پیشرفت دانست. نتایج به‌دست آمده مثلاً از برکت کاراندازی چرخه‌های گوناگون مورد استفاده را ارقام زیر مربوط به ۱۹۶۵ بخوبی نشان می‌دهند: بازده با یک چرخه ساده به ۱۸٪ رسید و با چرخه‌های دارای رکوپراسیون (بازیابی گرما) به ۲۸٪ و بازده با چرخهٔ دارای خنک‌سازی، گرم‌سازی میانی و بازیابی گرما به ۴۰٪ رسید. بدین‌ترتیب، می‌توان فهمید که دشواریهای متعددی که تکنسین‌ها برای تکامل شصت سالهٔ زندگی این نوع موتور درونسوز جدید باید برطرف می‌کردند از چه قماش بودند.

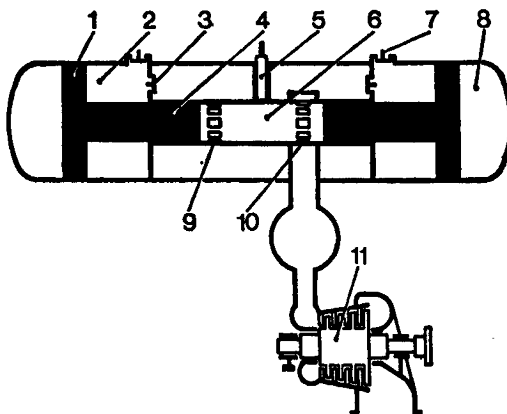
مولد با پیستونهای آزاد: پیش از آنکه به کاربرد توربینهای گازی بپردازیم باید بی‌درنگ از داستان جالبی از پژوهش فنی در این زمینه یاد کنیم، داستانی که پیشرفت موتورهای پیستوندار و موتورهای توربینی را به یکدیگر مرتبط می‌سازد.

آقای هوگو یونکرس از همان دههٔ نخست سدهٔ ما، نوعی کمپرسور هوا را که مجهز به یک موتور دیزلی دوهنگامی افقی بود مورد آزمایش قرار داده است. سیلندر این موتور، دو پیستون داشت که انبساط گازهای سوختی، آنها را به دو انتهای متقابل می‌راند. دستهٔ یکی از این پیستونها در انتهای خود حامل پیستون بزرگتری بود که داخل یک سیلندر کمپرسور عمل می‌کرد. بدین‌ترتیب، پیستونهای متقابل این سیلندر، هر کدام به یک پیستون کمپرسور، که در آن زمان برای تغذیهٔ یک توربین گازی نبود، فرمان می‌دادند.

کمپرسورهای با پیستونهای آزاد، تنها پس از گذشت سالیان زیاد به‌طور رضایتبخشی ساخته شدند. در جریان اقداماتی که برای ساخت هلیکوپتر انجام گرفت آقای رائول دو پاتروس پسکارا[1]، مهندس آرژانتینی تبار در فرانسه از این نوع کمپرسورها برای گردانیدن پره‌های هلیکوپتر از طریق واکنش هوای فشرده در انتهای پره‌ها استفاده کرد. کمپرسورهای با پیستونهای آزاد ساخت کارخانهٔ یونکرس در زیردریاییهای آلمان در جریان جنگ جهانی دوم بخوبی کار کردند.

پسکارا پس از آزمایشهای بی‌نتیجه در سال ۱۹۳۷ برای استفاده از کمپرسور به‌عنوان وسیلهٔ گازساز جهت توربین، پس از پایان جنگ این آزمایشها را برای یک مؤسسه فرانسوی از سر گرفت. در نخستین وسیله به‌عنوان کمپرسور، گازهای سوخته شده سیلندر دیزل، ناپدید شدند. اما در دومین وسیله به‌عنوان مولد، گازهای سوخته شده از نو، به شکل مخلوط با هوای فشرده برای گردانیدن یک

1. Raul de Pateros Pescara



شکل ۹۴.توربینی که یک گازساز دارای پیستونهای آزاد آن را تغذیه می‌کند.
۱. پیستون کمپرسور؛ ۲. استوانهٔ کمپرسور؛ ۳. سوپاپ پسزنی هوا؛ ۴. پیستون حرکت؛ ۵. سوختپاش؛ ۶. سیلندر حرکت؛ ۷. سوپاپهای مکش هوا؛ ۸. بالش هوایی؛ ۹. روزنه‌های روبش؛ روزنه‌های تخلیه؛ ۱۱. توربین گازی.

توربین سودمند افتادند (شکل ۹۴). این سیستم در سالهای ۵۰ کاربردهایی یافت: در لوکوموتیوها، حرکت دادن کشتیها، نیروگاههای حرارتی، اما محدود باقی ماندند.

موتورهای هواپیما: عملاً هواپیماهای جنگی بودند که پیشرفت توربینهای گازی را موجب شدند. بزودی دریافتند که فشار گازهایی که از محفظهٔ احتراق خارج می‌شوند می‌تواند چنان زیاد باشد که وسیله‌ای را که مجهز بدان است در هوا به پیش براند. از همان ابتدای کار، طرحهای گوناگونی پیشنهاد شدند و این واقعیت می‌رساند که مسأله یک رشته نوآوریهای دیگر در کار نیست بلکه پیگیری راههای گوناگون ساخت برپایهٔ یک اصل کلی است. درک کلی این بود که احتراق یک سوخت مایع باید با ایجاد یک فشار بر مخلوط سوختی، پیش از ورود آن در محفظهٔ احتراق بنحوی تأمین شود که سوخت با فشار زیاد به پیش پرتاب شود.

این هردو وسیله که برای ساختن کمپرسور تقریباً در یک زمان پیشنهاد شدند. نوعی کاربرد توربوکمپرسور و بهره‌گیری از فشار هوای جوّ به دهانهٔ موتوری بود که با سرعت زیاد می‌گردید. هرچند که بررسی این دو روش شانه‌به‌شانه پیش می‌رفت بخوبی نمایان است که روش دوم قبل از اولی به‌شکل استاتو رآکتور و پولسورآکتور مورد نظر بوده است. اما کاربرد آن دیر زمانی نپایید.

توربو رآکتورها طی سالهای ۱۹۲۵ ـ ۱۹۴۴ با دشواری زیادی تکامل یافتند اما پیشرفت آنها در سالهای بعد، از نظر تغییر دادن کامل تکنیکهای ساخت هوانوردی شهری و نظامی معجزه‌آسا بود.

باید به‌یاد آورد که این روش استفاده از توربین گازی جهت پرواز هواپیما، روشی بسیار ساده بود و تنها مستلزم پیوست ملخ هواپیما، به توسط دندهٔ تقلیل‌دهندهٔ سرعت، به محور توربین بود و این کار، فقط پس از اختراع توربو رآکتورها جامهٔ عمل پوشید.

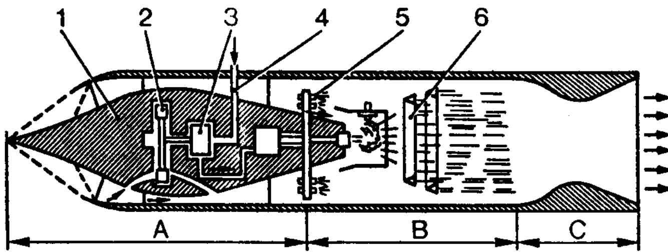
این تأخیر را تنها می‌توان یک نابهنجاری آشکار در ایجاد فرصتی برای انتقال از یک روش حرکت دادن به‌روش دیگر، دانست: روش ملخی با موتورهای پیستوندار به روش موتورهای واکنشی. کاربردهای اولیهٔ توربورآکتورها، همان‌گونه که خواهیم دید، تنها در هواپیماهای ارتشی بود این رآکتورها بسیارگران ساخته می‌شدند و تنها بتدریج توانستند آن را برای هواپیماهای سنگین حمل‌ونقل سازگار کنند. اما به‌طوری‌که دیده شد، نوآوری آنها، تکامل توربین گازی را به‌دنبال داشت. این نوع توربین که در دسترس قرار گرفته بود در آغاز در هواپیما به‌شکل موتورهای توربینی ملخدار به‌کار گرفته شدند و در آن زمان استفاده از نفت چراغ ارزان در برابر بنزین و با عدد بالای اوکتان موتورهای پیستوندار هواپیما را ممکن ساختند. بااین‌حال، ملخ هواپیما که توربین آن را تقویت می‌کرد نمی‌توانست از سرعت ساعتی ۸۰۰ تا ۹۰۰ کیلومتر برای هواپیما بگذرد. بدین‌علت بود که زمانی‌که دشواریهای توربو رآکتورها برطرف شدند آنها به‌جای توربو پروپولسورها، که تنها به‌طورکلی در سالهای ۵۰ به‌کار گرفته شده بودند، مورد استفاده قرار گرفتند. توربو رآکتور به‌علت داشتن وزن کم با وجود مصرف سوخت زیاد، به‌عنوان موتور هلیکوپتر توفیق فراوانی یافت.

استاتو رآکتورها و پولسورآکتورها: این موتورها بدون قسمت گردنده بودند و تقدم آنها نسبت به توربو رآکتورها محل تردید است. عادت شده است که تاریخچهٔ کوتاهی برای آنها داشته باشند زیرا آنها تنها در قسمت موتورهای تکنیکی با تحولات محدود، لااقل تا دوران ما، خودی نشان داده‌اند.

اصول کار استاتو رآکتور به سال ۱۹۱۳ موضوع اختراع یک فرانسوی با نام لورن[1] بوده است ـ اختراعی که هرگز ساخته نشد. فرانسوی دیگری؛ مهندس لودوک[2] که در سال ۱۹۲۶ بررسیهای نظری و عملی خود را آغاز کرده بود ده سال بعد نخستین استاتو رآکتور را ساخت. با این‌همه تنها در سال ۱۹۴۹ بود که یک هواپیما با موتور *Leduc 010* نخستین پرواز خود را انجام داد.

استاتو رآکتور ساده‌ترین موتور واکنشی است. این موتور شیپوره‌ای به‌شکل گلویی کربوراتور دارد که در آن هوا در اثر سرعت موتور متراکم می‌شود؛ محفظه‌ای دارد که سوختی که در آن پاشیده

1. Lorin 2. Leduc

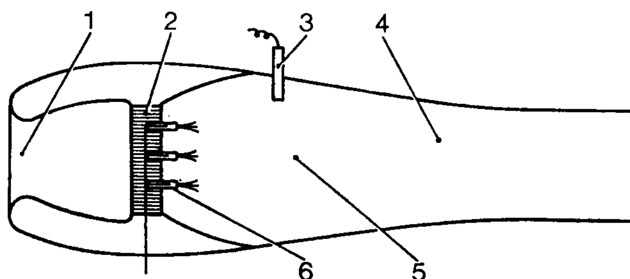


شکل ۹۵.استاتو رآکتور.
A: گلویی؛ B: محفظهٔ احتراق؛ C: شیپورهٔ پرتاب.
۱. بدنهٔ گلویی قابل تنظیم؛ ۲. توربین هوایی؛ ۳. تلمبهٔ سوخترسان؛ ۴. مکانیسم تغذیه؛ ۵. سوختپاشها؛ ۶. صفحات تثبیت‌کنندهٔ شعله.

می‌شود در تماس با هوای فشرده پیوسته در آن محترق می‌گردد و بالاخره یک شیپورهٔ واکنشی گازهای سوخته شده. آقای لودوک با پیگیری خود در سال ۱۹۵۶ توانست هواپیمای *Leduc 022* را با وسایل خاص خود با وارد کردن یک توربو رآکتور در داخل این استاتو رآکتور به پرواز آورد.

از آن پس، این استاتو رآکتور (شکل ۹۵) به مناسبت شماری دشواریهای تکنیکی تنها به‌عنوان موتور موشک به‌کار گرفته می‌شد. در این زمینه نیز برای برخاستن موشک از زمین غالباً آن را با موتوری مجهز می‌ساختند. تکامل استاتو رآکتور با تعدادی تضاد کاری آن برخورد کرد. این موتور که وسایلی را با سرعتهای بیشتر از یک ماخ (سرعت صوت) پیش می‌راند برای پرهیز از گرم شدن در اثر اصطکاک با هوا، آن را در لایه‌های بالای جوّ پرواز می‌دادند، اما در چنین شرایطی، چگالی هوا برای تغذیه آن کافی نبود.

اصول کار پولسورآکتور در آلمان بوسیلهٔ پل اشمیت در آغاز جنگ جهانی دوم مورد بررسی قرار گرفت. این کار شامل نوعی اصلاح استاتو رآکتور بود به‌طوری‌که بتواند با وسایل خاص خود حرکت را آغاز کند. راه‌حل کار، تغییر دادن شکل چرخهٔ کار با متواتر کردن آن بود و برای این کار ورود هوا به درون محفظهٔ احتراق را به‌کمک سوپاپهایی چند بخش کردند. زمانی‌که فشار در محفظه، پس از احتراق و نیز بیرون راندن گازهای سوخته شده از راه شیپورهٔ واکنش، پایین می‌آمد سوپاپها باز می‌شدند. ورود هوا و تزریق سوخت همزمان و به‌شکل خودکار برحسب شدت احتراق و مقدار فشار در محفظه انجام می‌گرفتند. برای آغاز، مخزنی از هوای فشرده، تغذیه را تأمین می‌کرد. بر این اساس Argus Motor Gesellschaft موتور پولسورآکتور اشمیت را که بمبهای پرندهٔ آلمانی



شکل ۹۶.پولسورآکتور.
۱. گلویی ورود؛ ۲. سوپاپهای ورود (شبکه با ۲۵۲ دریچه)؛ ۳. شمع اشتعال؛ ۴. شیپورهٔ پرتاب؛ ۵. محفظهٔ احتراق؛ ۶. سوختپاشها.

معروف به *V1* را حمل می‌کرد (شکل ۹۶)، ساخت. اولین V1 که بوسیلهٔ فیشر فلوگتسوک‌باو[1] (فیشر هواپیماساز) ساخته شد در دسامبر ۱۹۴۱ به‌طور آزمایشی در پینموند‌ه[2] پرتاب شد. نخستین پرتاب V1 به لندن در ژوئن ۱۹۴۴ بود و سه ماه پس از آن بمب پرندهٔ *V2* با موتور موشکی جای آن را گرفت.

پس از پایان جنگ، در فرانسه SNECMA [3] (شرکت ملی بررسی و ساخت موتورهای هواپیما) تحقیق بر روی پولسورآکتورها و همزمان با آن استاتو رآکتورها را از نو آغاز کرد. با وجود چند اصلاحی که انجام گرفت همان دشواریها درکاربرد، بی‌درنگ آشکار شدند. استاتو و پولسورآکتورها که در انتهای پره قرار داده شدند همچون موتورهای هلیکوپتر عمل کردند.

توربو رآکتورها: زمانی‌که داستانهای مربوط به رآکتورهای استاتیک دهان به دهان نقل می‌شد، موتورهای توربینی با سختی زیاد ساخته می‌شدند. در واقع دشواریهایی که حدود ۲۰ سال، این کار را به تأخیر کشانید همانهایی بودند که در همین دوران پیشگامان توربینها گازی با آنها دست و پنجه نرم می‌کردند. همان‌گونه که گفته شده است، این هر دو نوآوری چه از لحاظ تئوری و چه از نظر ساخت مشکلات واحدی داشتند که باید برطرف می‌شدند.

در سال ۱۹۱۰ آقای رومن هانری کواندا[4] در فرانسه نخستین هواپیمای واکنشی را ساخت اما

1. F. Flugzeugbau

۲. Peenemünde: دهستانی در جزیره‌ای کوچک در دهانهٔ رودخانهٔ پینه در مشرق آلمان، که در جنگ جهانی دوم، مرکز تحقیقات برای ساخت موشک بود.

3. Société Nationale d'Étude et de la Construction de Moteurs d'Avion

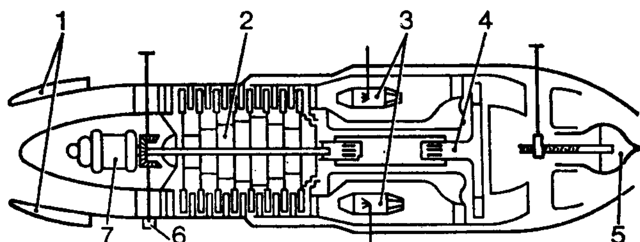
4. R. Henri Coanda

موتور آن، توربین گازی نبود. بااین‌حال، تردیدی نیست که آقای فرانک ویتل[1] در طرح توربو رآکتورها تقدم داشته است زیرا او بود که اندیشهٔ پرواز دادن هواپیما را با نیروی واکنشی در سال ۱۹۲۰ پیش کشید و در سال ۱۹۲۸ با جدیت برای ساخت آن کوشید. در این کار یک توربین گازی کمپرسور مرکزگریزی را راه می‌اندازد تا محفظهٔ احتراق را تغذیه کند؛ دتانت گازهای سوخته شده، نخست در توربین انجام می‌گرفت اما بعدها در شیپورهٔ پرتاب، تا پرواز را میسر سازد. ویتل در آغاز زیاد تشویق نشد و تنها با کمکهای مالی ناچیزی که به وی می‌شد توانست تحقیقات خود را دنبال کند. نخستین توربو رآکتور وی در سال ۱۹۳۷ مورد آزمایش قرار گرفت. دو سال بعد، به عللی که فهم آنها آسان است، سیاستمداران و ارتشیان بریتانیایی به‌کارهای وی بسیار علاقه‌مند شدند و در ماه مه ۱۹۴۱ هواپیمایی که با توربو رآکتور *Whittle-W1* پروازکرده بود نیرویی برابر ۳۷۴ کیلوگرم رانشی داشت. هواپیمایی ارتشی بریتانیا توانست تعدادی هواپیماهای جت را در آغاز سال ۱۹۴۴، دقیقاً در زمان لازم برای شکار کردن V1 های آلمان به‌کار گیرد. موتور این هواپیماها را رولز- رویس، به‌طور ردیفی می‌ساخت.

در آلمان، تنها در آغاز سال ۱۹۴۵ بود که در این کار توفیق یافتند، گرچه مقامات دولتی به‌کارهای هانس فون اوهاین[2] مبتکر این رشته در آن کشور از همان آغاز علاقه زیاد نشان دادند. آقای اوهاین در سال ۱۹۳۴، زمانی‌که دانشجو بود، دربارهٔ رآکتوری با کمپرسور مرکزگریز، اختراعی را به ثبت رسانید. تکنسین‌های دیگری در سالهای بعد برای شکستن محدودیتهای موتور ملخی در سرعت هواپیما در ساختن توربینهای گازی و حرکت دادن هواپیما با نیروی واکنشی، کوشیدند. در ماه اوت ۱۹۳۹، در آستانهٔ آغاز جنگ، نخستین هواپیمای جت جهان به‌کمک توربو رآکتوری که آقای اوهاین آن را طرحریزی کرده بود در آسمان آلمان به پرواز درآمد. اما برای اینکه آن را برای کار و به‌طور صنعتی بسازند هنوز خیلی عقب بودند. بعداً کار بین ماشین‌سازان متعددی: یونکرس، هاینکل و BMW تقسیم شد. پیشرفت کار تقریباً به کندی پیشرفت آن در انگلستان بود و علت آن شاید تعجیل فراوانی بود که در موقعیتی استثنایی که ایجاد همکاری مطلوب در حداقل زمان دشوار بود به‌عمل می‌آمد.

کارهای یونکرس و BMW به ساخت موتورهای دارای کمپرسورهای محوری انجامید: *Jumo 004* (شکل ۹۷) و *BMX 003*، درحالی‌که کمپرسورهای ویتل و اوهاین از نوع مرکزگریز بودند. یکی از اولین موتورهای آنها ۹۰۰ کیلوگرم رانشی نیرو داشت و در ژانویهٔ ۱۹۴۵ هواپیمای مسرشمیت 262 با این موتورها مجهز شدند، و حال آنکه ارتش امریکا تا دسامبر ۱۹۴۵ فاقد

1. F. Whittle 2. H. von Ohain



شکل ۹۷.توربو راکتور Jumo 004.

۱. مخزن سوخت؛ ۲. کمپرسور محوری؛ ۳. محفظهٔ احتراق؛ ۴. توربین؛ ۵. مخروط شیپورهٔ تنظیم‌پذیر؛ ۶. تلمبهٔ روغن؛ ۷. استارتر.

هواپیماهای جت بود.

تکامل توربو راکتورها: با پایان یافتن جنگ جهانی، توربو راکتورها، نخست برای هواپیمایی ارتشی، سپس از سال ۱۹۶۰ برای هواپیمایی کشوری بسرعت رواج یافتند.

مسألهٔ اصلی، مانند همه موتورهای درونسوز، اساساً عبارت از افزایش بازدهٔ کمپرسور با بالا بردن میزان فشار در محفظهٔ احتراق بود. بنابراین، تلاشها روی تکمیل کردن کمپرسور تمرکز یافت. در برههٔ ۱۹۴۰ ـ ۱۹۵۶ بازده کمپرسورهای مرکزگریز از ۷۰ به ۸۰ درصد افزایش یافت و میزان فشار از سه به چهار بالا رفت. این نتایج با روشهای تجربی به‌دست آمدند. اما، تکامل کمپرسور محوری، که در سال ۱۹۵۰ به‌طور قطعی جانشین کمپرسور مرکزگریز شد، درگرو محاسبات بسیار دشواری بود، و غالباً کار به کامپیوتر می‌کشید. بازده کمپرسور می‌توانست به ۹۰٪ برسد. انواع دیگری از کمپرسورهای محوری در سالهای ۵۰ به‌کار گرفته شدند، مثلاً کمپرسورهای دو بدنه‌ای که هر کدام توربین خود را داشتند و درصورت لزوم می‌توانستند با سرعتهای متفاوتی بگردند.

در همین دوران و تحت تأثیر این تحقیقات بود که برپایه نقشه‌ای کلیتر، توربین واقعاً گازی، مراحل تکاملی پیشین را پشت‌سر گذاشت.

دربارهٔ توربو راکتورهای هواپیماها باید یک رشته نوآوریها را به یاد آورد ـ نوآوریهایی که از نظر نوع راه‌حل برای افزایش کشش، بویژه در برخاستن از زمین به‌بهای افزایش کم وزن موتور بسیار جالب است. این راه‌حلها عبارت بودند از: احتراق بعدی، تزریق آب در محفظهٔ احتراق و بالاخره چرخهٔ دو جریانی.

نوآوری بسیار جالب احتراق بعدی، در واقع احتراق دومی است که در شیپورهٔ پرتاب انجام

می‌گیرد. گازها به‌هنگام خروج از توربین، هنوز مقدار زیادی اکسیژن دارند، آنها هنوز گرم و پرفشار هستند. تزریق تازه‌ای از سوخت در شیپوره، که طبعاً برای این کار باید آماده شود سبب می‌شود که شیپوره همچون نوعی استاتو رآکتور عمل کند و نیروی رانشی آن به مقدار نیروی رانشی توربو رآکتوری که آن را تغذیه می‌کند افزوده شود. رآکتورها که هواپیمای کنکورد را مجهز ساخته‌اند دارای دستگاه احتراق بعدی می‌باشند.

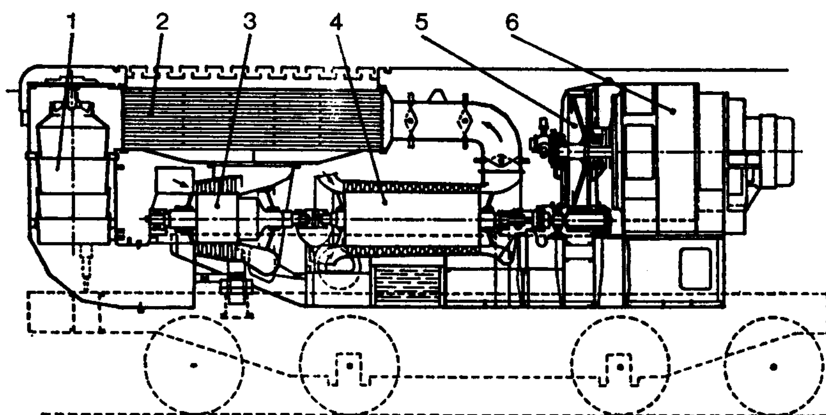
در گذشته دربارهٔ تزریق آب در توربین سخن رفت. در توربو رآکتورها این کار موجب افزایش نیروی رانشی موتور تا ۲۰٪ می‌شود. از آنجا که آب زیادی را جذب می‌کند، بنابراین یک مابه‌ازای وزنی و حجمی است، این کار فقط در زمان برخاستن از زمین و بسیار بندرت از سال ۱۹۶۰ عملی شده است: چرخهٔ دو جریانی عبارت از هدایت کردن مستقیم بخشی از هوایی که از کمپرسور کم فشار خارج می‌شود به شیپورهٔ پرتاب است، بدون اینکه این هوا از محفظهٔ احتراق و توربین بگذرد، این روش که در سال ۱۹۴۰ ابداع شد تا سال ۱۹۶۰ عملی نگردید. این کار قدرت موتور را به‌هنگام برخاستن از زمین بسیار بالا می‌برد و سپس در پرواز با سرعت کم، مصرف سوخت را تا ۲۰٪ و نیز سروصدا را در دهانهٔ شیپوره کم می‌کند.

این نمونه‌ها نشان می‌دهند که تکنیک توربو رآکتورها هنوز امکانات پیشروی زیادی دارند.

توربینهای گازی حمل‌ونقل: نتایجی که از توربو رآکتورها به‌دست آمد برای جانشین کردن توربینهای گازی به‌جای انواع موتورهای خودرو یا تأسیسات ثابت مورد استفاده قرار گرفت.

تولید آنها در رشتهٔ راه‌آهن پیشرفت زیادی داشت. یکی از نخستین لوکوموتیوهای مجهز به توربین گازی تاریخ ۱۹۴۱ را بر خورد دارد، لوکوموتیوی که با توربینی با قدرت ۱۶۰۰kW حرکت می‌کرد. این توربین را براون ـ باوری برای راه‌آهن سویس ساخت (شکل ۹۸). از این پس لوکوموتیوهای دیگر توربینی و با انتقال برقی در انگلستان و امریکا به کار گرفته شدند. مؤسسهٔ جنرال‌الکتریک تعدادی از آن را ساخت که بعضی از آنها قدرتهایی برابر ۲۵۸۰، ۳۳۰۰، ۶۲۵۰ kW داشتند.

در فرانسه که در آنجا موتورهای دیزل ـ الکتریک در سالهای ۵۰ پیشرفت زیادی داشت، شرکت ملی راه‌آهن در سال ۱۹۶۶ به تحقیقاتی دربارهٔ ساخت لوکوموتیوهای توربینی دست زد. بهره‌برداری بازرگانی از توربوترنهای اولیه در سال ۱۹۷۰ با اتصال به‌کمک کنورتیسور برقی و جفتگر هیدرولیکی انجام گرفت. پس از سال ۱۹۷۲ که نوع دیگری با سرعت حداکثر ۲۵۰ کیلومتر در ساعت به‌کار گرفته شد، نوع سومی مورد تحقیق قرار گرفت که شامل نوعی اتصال برقی بود و وسایلی که برای حرکت با برق صنعتی در آن به‌کار رفته بود، درگذشته در لوکوموتیوهای دیزلی به‌کار



شکل ۹۸.لوکوموتیو با توربین گازی، ساخت براون ـ باوری (۱۹۴۱).
۱. محفظهٔ احتراق؛ ۲. تأسیسات گرم‌کنندهٔ هوا؛ ۳. توربین گازی؛ ۴. کمپرسور؛ ۵. جعبه دنده؛ ۶. دینام.

گرفته می‌شدند: آلترناتور سه فاز، یکسوکنندهٔ سیلیسیمی، موتورهای دارای کشش پیوسته، که اکنون آنها را برای این نوع جدید کشش آماده کرده بودند. این قطارهای جدید می‌توانستند سرعتی برابر ۳۱۸ کیلومتر در ساعت داشته باشند و زمانی‌که راه‌آهنهای تازه، میان پاریس و لیون (حدود ۵۰۰ کیلومتر) گشایش یافت در این مسافت می‌توانستند سرعت هواپیما را داشته باشند؛ اما به‌علت زیاد بودن هزینهٔ سوخت و مشکلات مربوط به واردات فراورده‌های نفتی، که کشورهای اروپایی با آن دست و پنجه نرم می‌کنند مؤسسهٔ SNCF [1] از توسعهٔ کاربرد توربوترنها صرفنظر کرد و ساخت ترنهای سریع‌السیر خود را با جریان برقی دنبال گرفت. در اینجا ما با نمونهٔ گویایی از یک نوآوری فنی روبه‌رو هستیم که به علل اقتصادی، هیچ کاربردی نیافت.

در مورد حمل‌ونقل دریایی باید گفت که نخستین توربین گازی به‌عنوان آزمایش در سال ۱۹۴۷ بوسیلهٔ متروپولیتن ویکرز در یک کشتی توپدار انگلیسی کارگذاشته شد. با آزمایشهای دیگری که انجام گرفت در سال ۱۹۵۱ یک توربین ساخت بریتیش تامسن ـ هوستن با قدرت ۴۰۵۰kW به‌جای چهار دیزل یک نفتکش به نام *Auris* به‌کارگرفته شد. آزمایشهای دیگری در ممالک متحدهٔ امریکا، در یک کشتی به نام *Liberty Ship* به‌عمل آمد و در سال ۱۹۶۵ در کشتی *John Sergeant* اقیانوس‌پیما توربینی با ۵۵۰۰kW کارگذاشته شد.

۱. Société Nationale de Chemins de fer Frauçais ، به معنای شرکت ملی راه‌آهن فرانسه. ـ م

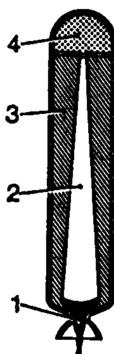
برای کاربرد توربین گازی به‌جای موتور اتومبیل، طبعاً کارهای زیادی انجام گرفت. هر اتومبیل می‌بایست با دو توربین تجهیز می‌شد: یکی برای کمپرسور و دیگری برای حرکت دادن آن. در ماه ژوئن ۱۹۵۲ یک اتومبیل *Rover* مجهز با این توربینها رکورد جهانی سرعت اتومبیلها را شکست. اما مشکلات ویژهٔ بازده، سرعت گردش، سروصدا و بهای تمام شده، مانع جدی در برابر رواج آنها بود.

تأسیسات ثابت: توربین گازی از سال ۱۹۵۰ تقریباً به‌طور اساسی به‌عنوان منبع انرژی در نیروگاهها به‌کار گرفته شده است. طبیعی است که احساس کنیم که گسترش راه‌حلها نسبتاً متناسب با تنوع نیازهایی بودند که باید رفع شوند و نیز شرایط کاربرد: تعداد محفظه‌های احتراق؛ خنک‌سازی با هوا؛ کاربرد یا عدم کاربرد وسایل بازیابی گرما؛ دسته‌بندی محورها روی یک یا چند ردیف. نوعی که بیشترین رواج را یافت دارای یک بازیابندهٔ گرما و یک وسیلهٔ گرم‌کنندهٔ مجدد و نیز خنک‌سازی بینابینی است که مورد نیاز محفظه‌های احتراق متعدد است. این راه‌حل مستلزم هزینهٔ ساخت گزاف اما بازده خوبی است که زمانی‌که توربین مدت زیادی با تمام قدرت کار می‌کند ضروری باشد.

نخستین تأسیسات را در این زمینه، مؤسسهٔ براون ـ باوری برای نیروگاههای بتسناو[1] واقع در سویس و لیورنو در ایتالیا در ۱۹۴۵، و پورت‌من[2]، واقع در کانادا ۱۹۵۹ برپا کرد. نیروگاه بتسناو دو توربین گازی داشت با قدرتهای ۱۳۰۰۰ ـ ۲۷۰۰۰kW؛ نیروگاه لیورنو دو گروه و از آن پورت‌من چهار گروه توربین گازی داشت که هریک ۲۵۰۰۰kW قدرت داشتند. در سالهای ۶۰ تقریباً همهٔ مؤسسات بزرگ به ساخت آن می‌پرداختند. مؤسسات انگلیسی و امریکایی مدلهایی را که برای توربو رآکتورهای هواپیما طرح شده بودند تکامل بخشیدند در فرانسه، SNECMA در سال ۱۹۶۳ یک گروه ۱۰۰۰۰kW را برپا کرد. این گروه با ویژگی‌های دستگاههای گازساز، دارای یک توربو رآکتور ATAR 09 بود که این مؤسسه برای هواپیماهای جنگی میراژ ساخته بود. بدین‌ترتیب، روشن می‌شود که جنبه‌های مختلف این رشته تا چه اندازه با یکدیگر ارتباط تنگاتنگ دارند.

تکامل توربینهای گازی سرانجام به طرح موتوری انجامید که فراتر از موتورهای درونسوز به‌معنای دقیق کلمه بود؛ یعنی توربینهایی که در آنها گاز یک مدار بسته را طی می‌کرد. به‌عبارت دیگر یک جرم گازی در مداری منفرد از جوّ، با فشاری که طوری محاسبه شده است که توان موتور را متناسب با ابعاد آن، افزایش دهد. این نوع توربین در سال ۱۹۰۰ بوسیلهٔ کنوریک[3] و نادروفسکی[4] طرح شده بود و تنها پس از جنگ جهانی دوم بود که آقایان آکرت[5] و کلر[6] در مؤسسهٔ اشرـ ویس[7] زوریخ آن را ساختند. این توربین حتی از نظر اصول به موتورهای هوای گرم استرلینگ شباهت

1. Beznau 2. Portmann 3. Knorrig 4. Nadrowsky 5. Ackeret 6. Keller
7. Escher-Wyss



شکل ۹۹.موشک باروتی۱. شیپورهٔ پرتاب؛ ۲. جان مخروطی؛ ۳. باروت سیاه؛ ۴. رأس انباشته.

داشت. با نمونهٔ اخیر بدون تردید بخوبی فهمیده می‌شود که مجموعهٔ موتورهای حرارتی در سراسر تاریخ خود با همان تنوع زیاد اصول کار، تا چه اندازه یک کل نسبتاً همگون را تشکیل می‌دهند.

موتورهای موشکی

تاریخ پیدایش موشکها هم مانند تاریخ باروت سیاه مبهم است. تاریخ معینی را نمی‌توان پیشنهاد کرد زیرا نوشته‌هایی که دربارهٔ سلاحهای قدیم در دست است مبهم می‌باشند و اظهارنظر دربارهٔ اینکه فلان سلاح با موشک فرستاده می‌شد یا تنها آتشین بود کار بسیار دشواری است.

موتورهای درونسوز اولیه بسیار ساده بودند. موتور موشکی نُوعی موتور جت است که انرژی شیمیایی یک مخلوط سوختی و مادهٔ سوزا (اکسیدکنندهٔ سوخت) را، که مدت زیادی باروت سیاه بود، مستقیماً به انرژی جنبشی تغییر شکل می‌دهد.

موتور موشکی باروتی در آغاز به‌طور ساده از یک استوانه چوبی یا مقوایی و بعدها آهنی که یک سر آن بسته بود تشکیل می‌شد. این استوانه درعین‌حال کار محفظه احتراق، مخزن سوخت و شیپوره را انجام می‌داد. باروت درون استوانه چنان سنبه‌کاری می‌شد که در محور به‌اصطلاح «جان موشک» خلأیی به‌شکل مخروط ناقص ایجاد شود. این کار سبب می‌شد تا سطح احتراق افزایش و فرار گازها شدت گیرد (شکل ۹۹)

فشار درون استوانه، نسبتاً پایین بود و دمای احتراق میان ۲۲۰۰ تا ۲۴۰۰ درجه نوسان داشت. در فرصتهای به‌دست آمده اشاره‌ای به موشکهای قدیم دیده شد که اگر هم اصول کار احتمالاً

حدود آغاز قرون وسطی شناخته شده است، کاربرد آنها طی چندین سده بندرت انجام گرفته است. گاهی از کاربرد آنها در عملیات جنگی، ایجاد آتش‌سوزی در ناوها یا شهرها یادی شده است، بدون اینکه این سلاح کاربردی کلی داشته باشد. بهترین موفقیت آنها در آتش‌بازیهای اعیاد بود. در پایان سدهٔ هفدهم، خانواده رووجری[1] در این هنر اشتهار فراوان به‌دست آورده بود.

طی این مدت طولانی، در چین و اروپا، که چیز زیادی به‌اصول بسیار ساده این کار که رواج بسیاری یافته بود، نیافزودند نوشته‌های فراوانی انتشار یافت. چند اصلاحی در مورد محاسبهٔ نسبت قطر به ارتفاع استوانه، که معمولاً در موشکهای کوچک ۱/۶ و در موشکهای بزرگ ۱/۴ بود و نیز ترکیب مخلوط پیشرانه، که همگی برپایهٔ باروت بودند، نحوهٔ تأمین استحکام و هدایت موشکها به‌عمل آمد. پره‌های حفظ تعادل، گویا تنها در آغاز سدهٔ هجدهم به‌کارگرفته شدند. موشکهای چند مرحله‌ای در آغاز سدهٔ شانزدهم ساخته می‌شدند. نوشته کازیمیر سمینوویچ ، مهندس لهستانی با عنوان *Artis Magnae Artilleriae* که در سال ۱۶۵۰ در آمستردام چاپ شد همه اطلاعات دربارهٔ این موضوع را که بیش از دو سده هیچ تغییری در آن راه نیافته بود، شامل می‌شد.

نخستین کاربرد منظم موشکها را ارتش انگلیس در جنگهای امپراطوری انجام داده است و گویا کشورهای دیگر در سدهٔ نوزدهم از این نمونه تقلید کرده‌اند. در این دوران مخلوط سوخت و سوزا هنوز مانند قبل از آن، جامد بود. مواد پروپرگول جامد، در زمان ما هم مصرف می‌شود؛ اما ویژگی سوخت جدید، مایع بودن پروپرگولهاست. برای اینکه شرح تاریخ آشفتهٔ این اختراع تا حدودی نظم پذیرد، نخست از کاربرد پروپرگولهای جامد و سپس از انواع مایع آن سخن خواهیم راند.

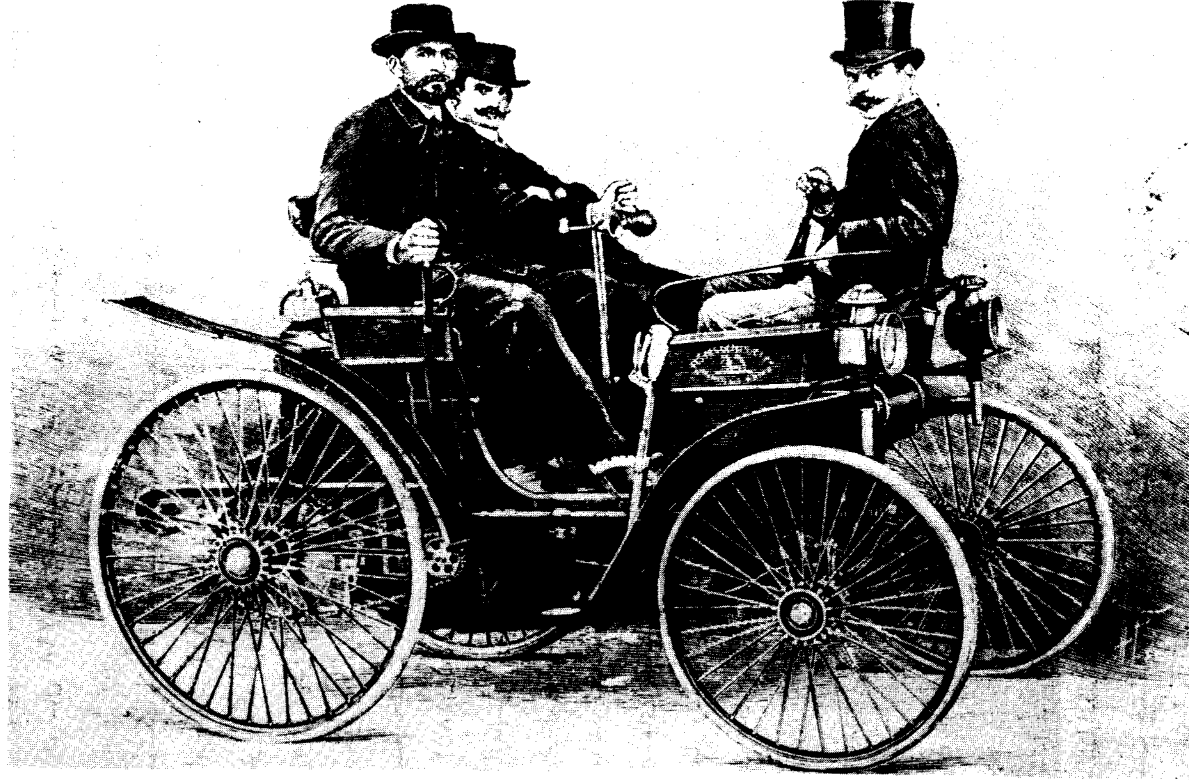
کلمهٔ پروپرگول، که یک واژهٔ ثبت شده است گویا از زمان جنگ جهانی دوم وارد فهرست واژگان جدید شده است و معنی بسیار کلی دارد.

موتورهای موشکی با پروپرگولهای جامد

آقای ویلیام کانگریو[2] ژنرال انگلیسی که ریاست تسلیحات وولیچ[3] با او بود بررسیهای نخستین روی کاربرد موشک به‌عنوان یک سلاح را آغاز کرد؛ علت این امر مشاهداتی بود که خود وی از تأثیر این سلاح روی ارتشهای هند در سال ۱۷۹۹ داشت. وی در سال ۱۸۰۶ از این اسلحه علیه اردوگاه بولونی استفاده کرده بود اما بویژه در سال بعد از آن علیه شهر کپنهاگ، که ۲۰۰۰۰ موشک طی چهار روز به‌سوی آن شهر پرتاب شد، از این سلاح استفاده کرد.

---

1. Ruggerie 2. W. Congreve 3. Woolwich



تابلوی ۹. یکی از نخستین خودروهای پژو (حدود ۱۸۹۰).

اصلاحات نظامی: چنین می‌نماید، مدارکی هم در دست است که افسری فرانسوی با نام پره‌وو[1] افتخار وارد کردن دوبارهٔ موشک جنگی را به اروپا و نیز بهتر کردن دقت تیر آن را دارد. این افسر در سال ۱۷۹۸ در سباستوپول مرد. وی موشکهای آتشزایی با آتش یونانی ساخته است.

این موشکها را بعدها انگلیسیان در جنگهای فلسینگ[2]، ویتنبرگ[3]، دانتسیک، لایپزیک (۱۸۱۳) و بعد در امریکا در ۱۸۱۴ به‌کار بردند. این موشکها ۵۰، ۸۰ و ۱۲۰ میلیمتر قطر داشتند؛ برد آنها ۳۰۰۰ متر بود که از برد توپهای معمول در آن زمان تجاوز می‌کرد.

کشورهای دیگر به این موشکها علاقه‌مند شدند: دانمارک، اتریش، امریکا، ایتالیا آن را در تسلیحات خود وارد کردند.

در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم موتورهای موشکی روزبه‌روز نیرومندتر شدند به‌طوری‌که در جنگهای ۱۸۵۴ ـ ۱۸۵۵ سباستوپول، خرج آنها به ۸۰ پوند و بردشان به هفت کیلومتر رسید.

برای آزمایش قدرت موتورها در مدرسه و مهندسی مس (در ۳۰۰ کیلومتری شرق پاریس) از شلیک کردن موشک صرفنظر کردند و با فنرهای یک توانسنج (دینامومتر) ثباتدار توان آن را سنجیدند و، بدین‌ترتیب، توانستند نیروی فزون‌یابندهٔ آن را در هر لحظه تعیین کنند. شاید این را نخستین پایگاه آزمایشهای استاتیکی بتوان دانست. نتیجهٔ این بررسیها اطلاع بر چگونگی پروپرگولهای جامد گوناگون به‌کار رفته و نیز بررسی شکل محفظهٔ احتراق بود. معلوم شد که یک «جان استوانه‌ای» بیش از یک «جان مخروطی» که تا آن زمان معمول بود تأثیر دارد.

همین‌طور، مقدار کوبیدن خرج موشک با یک توانسنج همراه شد تا فشار ایجاد شده معلوم باشد و بدین‌ترتیب از انفجار موشک پرهیز شود. سیستم آتش کردن نیز با استفاده از وسیله‌ای که به‌طور مکانیکی مشتعل می‌شد و شعله آن‌قدر دوام می‌یافت تا باروت آتش بگیرد، بهتر شد.

اما برای یکبار دیگر هم، موشک در زمینهٔ نظامی دربرابر توپ سر تعظیم فرود آورد. در این زمان لوله‌های خاندار و باروت بی‌دود پدید آمده بودند و بنابراین تیراندازی با توپخانه دقت قابل توجهی یافت؛ بدین‌ترتیب، از نو موشک از میدان جنگ بیرون شد (۱۸۶۶ در اتریش، ۱۸۷۲ در فرانسه)، و تنها انگلستان بود که به‌طور سنتی آن را حفظ کرد.

با گذشت چند دهه، موشک باز به میدان آمد. ژنرال روسی کنستانتینوف در پایان سدهٔ نوزدهم و بارون فون اوگه[4] در آغاز سدهٔ بیستم، درپی ایجاد چند اصلاح در آن شدند. اوگه به یک رشته آزمایش برای استفاده از موتور موشکی در اژدرها دست زد. نخستین جنگ جهانی شاهد فعالیت

1. Prevost 2. Flessingue 3. Wittenberg 4. B. von Uuge

تابلوی ۱۰. موتور آزمایشی رودلف دیزل (۱۸۹۳).

تازهٔ موشکها بود. از آنها بویژه برای از بین بردن بالونهای دشمن، فرستادن پیامهایی در آسمان شب و نیز ساخت موشکهای رسام استفاده شد.

در پایان سدهٔ نوزدهم و آغاز سدهٔ بیستم به‌جست‌وجوی راههایی برای استفاده از موشکها برای مقاصدی برآمدند که کمتر مرگ‌آور باشد.

در سال ۱۸۶۵ آقای بویسون[1] اختراعی برای استفاده از موشک به‌عنوان موتور هواپیما به ثبت رسانید. آقای آمده‌دنی در فرانسه ول. رورمان[2] در آلمان در پایان سدهٔ نوزدهم کاربرد موشک را برای عکسبرداری هوایی پایه گذاردند.

کارهای ر. گدارد: فیزیکدان امریکایی آقای رابرت گدارد که برای یافتن وسایلی جهت کشف لایه‌های بالای جوّ در سالهای ۱۹۱۳ ـ ۱۹۱۹ می‌کوشید کارهای منظم فراوانی در زمینهٔ پیشرفت موشکها انجام داده است.

رابرت گدارد دربارهٔ موشکهای دارای سوخت باروت سیاه یا باروت بی‌دود مطالعات ارزشمندی دارد. وی در سال ۱۹۱۳ دربارهٔ موشک دو مرحله‌ای و در ۱۹۱۴ برای ساختن موتور موشکی که با فشنگهایی به‌طور خودکار یکی پس از دیگری در محور شیپورهٔ آن جای می‌گرفت امتیازاتی را به ثبت رسانید.

آقای گدارد در برهه ۱۹۱۵ ـ ۱۹۸۱ توانست بازده موتور موشکی را تا ۶۵٪ افزایش دهد؛ این توفیق اساساً به برکت افزایش سرعت گازهای پرتاب‌شونده به‌دست آمد. وی برای تحقیقات خود از وسیله‌ای استفاده می‌کرد که از یک محفظهٔ احتراق و مکانیسمی از لوله‌ها با طولهای متفاوت تشکیل می‌شد. این وسیله به وی امکان می‌داد که نسبت محفظه احتراق به شیپوره را به‌طور پیوسته تغییر دهد و سرعت پرتاب گازها و بازدهٔ حرارتی را محاسبه کند. او بدین‌ترتیب بهترین شکل شیپوره را به‌دست آورد.

آقای گدارد در سال ۱۹۱۹ نتایج تحقیقات خود را روی موتور موشکی با سوخت جامد انتشار داد. نتیجه‌گیریهای وی در مورد این موتور بدبینانه بود. وی اندیشید که موشک با پروپرگول جامد نمی‌تواند تا ارتفاع مورد نظر بالا رود و بنابراین وی از آغاز سال ۱۹۲۰ کوشید تا سوخت مایعی برای موشکها تهیه کند. این مطلب بعداً شرح داده خواهد شد.

هرچند که پس از این تاریخ موتور موشکی با سوخت مایع پیشرفت زیادی داشت و موشکهای با سوخت جامد را تحت‌الشعاع قرار داد، موشکهای اخیر بکلی کنارگذاشته نشدند و به‌عنوان موتور کمکی موشکهای دارای سوخت مایع مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

1. Buisson 2. L. Rohrmann

در فرانسه، تحقیقات مفیدی بوسیله مدرسه ملی پیشه و هنر، از ۱۹۱۶ به‌مدت سی سال با سرپرستی هانری ف. ملو[1] روی موشکهای دارای سوخت جامد به‌عمل آمد. هدف این تحقیقات استفاده از این موتورهای کمکی برای سرعت دادن به هواپیما بود. موتورهای موشکی با سوخت باروت سیاه هم بوسیله آقای لویی دامبلان[2] (بین سالهای ۱۹۳۲ ـ ۱۹۳۵) برای موشکهای پیام‌رسانی، و نیز در مؤسسه پیروتکنیک شهر رووجری و نیز مدرسهٔ پیروتکنیک شهرستان بورژ مورد مطالعه قرار گرفتند. در اینجا باید اشاره‌ای هم به‌کارهای اسنو ـ پلتری کرده باشیم، که برای سرعت دادن بمبها، موتورهای موشکی ۸۰ میلیمتری را مورد مطالعه قرار داد.

کارهای آلمانیها: در آلمان، موشکهای باروتی، که نخستین موشکهایی بودند که برای حرکت انواع وسایل نقلیه به‌کارگرفته شدند بوسیله فریدریک ویلهلم زاندر[3] ساخته می‌شدند. آقای ماکس والیر[4] با آقای فریتس فون اوپل (کارخانه‌دار بزرگ اتومبیل‌سازی) و آقای زاندر ماشین‌ساز در سال ۱۹۲۸ نخستین خودروی را که با موشک حرکت می‌کرد ساختند. روی این خودرو به‌جای موتور و وسیلهٔ انتقال حرکت، یک موشک نصب شده بود.

در همین سال ماکس والیر خودرویی ساخت که روی ریل حرکت می‌کرد و خودروی دیگری که روی برف می‌لغزید. هر دو خودرو به موتور موشکی مجهز بودند.

باز در سال ۱۹۲۸ بود که نخستین هواپیمای با موتور موشکی به پرواز درآمد. در آغاز گلایدر *Ente* بود که سازندگان هواپیماهای بی‌موتور رون ـ روستین[5] آن را ساخته بودند. این هواپیما در ۱۱ ژوئن ۱۹۲۸ به‌کمک دو موشک زاندر، پروازکرد و در ۳۰ سپتامبر آقای فریتس فون اوپل یک گلایدر دارای شش موشک زاندر را خلبانی کرد و با آن سرعتی برابر ۱۵۰ کیلومتر در ساعت داشت.

در سالهای ۳۰ آقایان راینهولد تیلینگ[6]، فریدریش اشمیدل[7] و گرهارت تسوکر[8] دست به‌کار ساخت موشکهای با سوخت پروپرگول جامد، برای حمل مکاتبات پستی شدند. سپس در پایان این سالها و در آستانه جنگ جهانی دوم و طی آن، موتورهای موشکی با سوخت جامد و نیز با سوخت مایع، به‌علت کاربردشان در مقاصد ارتشی، تکان دیگری در جهت تکامل دریافت داشتند.

در آلمان موتورهای موشکی با سوخت جامد راکه شرکت Schmidding Dynamit A. G. می‌ساخت به‌عنوان موتور شتاب‌دهنده برای اینکه هواپیماهای سنگین از زمین برخیزند، و نیز به‌عنوان موتور تعدادی موشک زمین ـ هوا و زمین ـ زمین، موشکهای ضدتانک و موشک هوا ـ زمین به‌کار گرفته شدند.

---

1. H. F. Melot 2. L. Damblanc 3. F. W. Sander 4. Max Valier 5. Rhön-Rossiten
6. Reinhold Tiling 7. F. Schmiedel 8. Gerhardt Zucker

اثرات جنگ جهانی دوم: بریتانیای کبیر تحت تأثیر روحیهٔ محافظه‌کاری، تنها کشوری بود که موشکهای با سوخت پروپرگول جامد در آنجا مورد نظر بود. در سال ۱۹۳۵ تحت نظر آقای الوین داگلس‌کراو[1] در تسلیحات وولیچ کارهایی برای راه‌اندازی موتورهای موشکی با باروت بیدود، کوردیت، انجام گرفت. با بهره‌گیری از این تحقیقات، در آغاز جنگ جهانی دوم، انگلستان در رشتهٔ ساخت موشکهای با سوخت جامد پیشرفته‌ترین کشور بود و ممالک متحدهٔ امریکا از اطلاعات انگلستان استفاده می‌کرد. موتورهای موشکی انگلستان برای همان مقاصدی به‌کار گرفته شدند که موتورهای موشکی آلمان.

در ممالک متحده امریکا، آقای لسلی استینر[2] سرشناسترین محققی بود که در رشته موشکهای با سوخت جامد کار می‌کرد. تعدادی باروتهای دارای ترکیب ساده و دو پایه مورد آزمایش قرارگرفتند که بهترین آنها مبنای پرکلرات پتاسیم و آسفالت داشت. در زمان جنگ جهانی دوم، بر این پایه موتورهایی با نیروی رانشی ۱۰۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ کیلوگرم داشتند و از آنها به‌عنوان موتورهای کمکی برای برخاستن هواپیما از زمین استفاده می‌شد. کاربردهای ارتشی دیگری با موتورهای موشکی ایجاد شدند، از جمله می‌توان از بازوکا، سلاحهای ضدتانک با برد کم نام برد.

حدود پایان جنگ، در چارچوب برنامهٔ Wac-corporal، قویترین موتور با سوخت پروپرگول جامد ساخته شد که نیروی رانشی آن در ۰٫۶ ثانیه ۲۳۰۰۰ کیلوگرم بود و به‌عنوان موتور شتاب‌دهنده برای برخاستن موشک از زمین به‌کار گرفته شد. بعدها این موتور جای خود را به موتوری با پروپرگول مایع داد. در اتحادجماهیر شوروی سابق در سال ۱۹۳۶ موتورهایی با پروپرگول جامد ساخته شد، که به ساخت موتورهای معروف کاتیوشا با باروت دوپایه انجامید.

پس از جنگ دوم ساختن موتورهای موشکی با سوخت جامد با شدت، بویژه در امریکا، به‌علت کاربرد آن در زمینهٔ ارتشی دنبال شد.

در آغاز کار، این موتورها از نظر توان در ردیف پایین‌تر موتورهای با سوخت پروپرگول مایع جای داشتند اما در دههٔ ۱۹۵۰ بر اثر پیشرفتهایی که در ساختمان آن ایجاد شد و به‌کارگیری پروپرگولهای جامد جدید، اختلاف برد این دو نوع موشک، اندک شد. وانگهی این موتورها بسیار ساده و نیز ارزان بودند و ترکیب سوخت آنها قابل تغییر بود؛ این سوخت را می‌شد انبارکرد و کمتر خطرناک بود. با این‌همه آنها به‌علت امکان‌ناپذیر بودن خاموش کردن، اشتعال مجدد و نیز کنترل کردن و تغییر دادن مقدار بُرد، رواج زیادی نیافتند.

پس از جنگ جهانی دوم بود که نخستین موشک چند مرحله‌ای ساخته شد: پیش بردن

1. Alwyn Douglas Crow 2. Lesli Stinner

مراحل مختلف یا با موتورهای دارای سوخت جامد یا با سوخت مایع انجام می‌گرفت. به‌طورکلی، نوع ساختمان و نیز ترکیب پروپرگولها، جزء اسرار نظامی است.

در امریکا، پس از جنگ جهانی دوم، از پروپرگولهای جامد نخست برای موتورهای ویژه برخاستن هواپیماهای *Snark* (هواپیمای موشک‌انداز با سرعت کمتر از صوت) از زمین استفاده می‌شد و بعدها در سالهای ۵۰ یک موتور با سوخت جامد را مؤسسه Jet Propulsion Laboratory برای موشک *Hermes A2* ساخت. تعداد زیادی موشکهای با برد کم با این نوع موتور مجهز شدند.

بعدها این موتورها با افزایش توان و برتریهایی که داشتند بر روی موشکهای با برد بلند گذاشته شدند. جوپیتر که نخستین موشک امریکا با برد متوسط بود شامل یک مرحلهٔ دوم با ردیفی از یازده موتور موشکی بود و یک مرحلهٔ سوم که سه موتور موشکی آن را حرکت می‌داد. سوخت همهٔ موتورها پروپرگول جامد بود. پولاریس هم که پس از ۱۹۶۰ ساخته شد دو مرحله‌ای با برد ۴۷۰۰ کیلومتر بود که از زیردریایی پرتاب می‌شد و مینوتمن سه مرحله‌ای با برد ۱۲۰۰۰ کیلومتر بود.

نخستین موشک فضاپیمای امریکا وانگارد که برای نخستین‌بار در سال ۱۹۵۷ به فضا پرتاب شد، سه مرحله‌ای و با سوخت جامد بود. شمار زیادی موشک هواشناسی نیز با سوختهای جامد پرتاب شده‌اند.

اتحاد جماهیر شوروی سابق نیز موتورهای موشکی با سوخت جامد تقریباً برای همین منظورها ساخته است. تقریباً می‌توان در همه کشورها این کارها را دید برخی آزمایشهای پیش از جنگ خود را دنبال می‌کنند و عده‌ای نیز دنباله‌روی کشورهای پیشگام هستند.

موتورهای موشکی با پروپرگولهای مایع

در اواخر سدهٔ نوزدهم و اوایل سدهٔ بیستم، پژوهشگران که بویژه امید به کشفیات فضایی آنان را دلگرم می‌ساخت در تکامل موتورهای موشکی با به‌کارگیری سوختهای تازه، بخصوص مایع می‌کوشیدند.

گرچه اصول کار موتورهای با سوخت جامد و مایع تفاوتی با هم نداشتند، موتورهای با سوخت مایع آشکارا پیچیده‌تر بودند. محفظهٔ احتراق آنها از مخزن (یا مخازن) سوخت جدا بود و موتور به مکانیسم تغذیه و خنک‌سازی نیاز داشت.

گرچه در آغاز، پژوهشگران کشورهای مختلف (بویژه آلمان، ممالک متحدهٔ امریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق) برای تکامل و شکوفایی اختراع موشک با یکدیگر همکاری داشتند و از

دستاوردها و ساخته‌های خود، همکاران را بی‌اطلاع نمی‌گذاشتند، پس از مدت کوتاهی، همهٔ این رشته صنعت در پردهٔ اسرار نظامی پوشیده شد، همان‌طورکه در سالهای ۳۰ اطلاعات مربوط به سوخت جامد در ردیف اسرار ارتشی قرار گرفت. بنابراین راه‌حلهای اساسی و تکمیلها غالباً بوسیلهٔ پژوهشگرانی که از کارهای کشورهای دیگر بیخبر بودند انجام می‌گرفت و تاریخ موتورهای موشکی تاریخی است که در چند کشور موازی با یکدیگر نوشته شده است.

نخستین موتورهای با سوخت مایع: موتورهای موشکی با سوخت مایع، معمولاً با دو نوع پروپرگول کار می‌کنند: سوخت و سوزا؛ گرچه بعدها موتورهایی با سوخت تکی (monergol) ساخته شدند، که در آینده دربارهٔ آنها سخن خواهیم گفت.

کهنترین نمایندهٔ موتورهای موشکی با سوخت مایع مربوط به سال ۱۹۰۳ می‌شود و ساختهٔ دانشمندی روسی با نام تسیولکوفسکی است. پروپرگولهایی که وی از آنها نام می‌برد در ردیف بهترین سوختهای این زمان است: اکسیژن مایع و هیدروژن مایع.

اما آقای تسیولکوفسکی زندگی خود را وقف ساخت و آزمایش موتورهای موشکی نکرد و همهٔ کوششهای خود را بر جنبه‌های نظری حرکت در اثر عکس‌العمل در فرضیهٔ پروازهای بین ستارگان متمرکز ساخت. وی در سال ۱۹۰۳ بروشوری با عنوان: پژوهشهایی برای اکتشافات کیهانی به‌کمک وسایل واکنشی انتشار داد و در آن برای نخستین بار در جهان ثابت کرد که تنها وسیلهٔ فرار از جاذبهٔ زمین، استفاده از موشک است، موتوری که می‌تواند در خلأ حرکت کند. آقای تسیولکوفسکی بدین‌طریق کاربرد موشکهای چند مرحله‌ای را که وی «ترن موشکها» می‌نامد پایه گذارد. گرچه وی نظرات شجاعانه‌ای طرح کرده است کارهای وی بدون دنباله بودند.

نخستین موتور موشکی با سوخت مایع را آقای پدرو آ. پوله[1]، مهندس شیمی اهل پرو در برهه ۱۸۹۵ ـ ۱۸۹۷ در پاریس ساخته است، اما کارهای وی تا مدتها ناشناخته ماند، موتور وی کوچک و محفظهٔ احتراق آن از فولاد بود که با سوخت پروکسیدنیتروژن و بنزین کار می‌کرد. یک شمع الکتریکی آن را مشتعل می‌ساخت. این موتور می‌توانست با هر ۳۰۰ انفجار در دقیقه، نیروی رانشی برابر ۱۰۰ کیلوگرم ایجاد کند. این ارقام را آقای پوله در سال ۱۹۲۷ زمانی‌که قصد داشت کارهایش را شروع کند، داده است.

در سالهای ۱۹۰۵ ـ ۱۹۰۷ آقای بیرکلند[2] نروژی نیز دربارهٔ موشکی که بویژه با سوختهای اکسیژن و هیدروژن مایع کار می‌کند پژوهشهایی کرده است.

1. Pedro A. Paulet 2. Birkeland

سهم آقای گدارد: نخستین پژوهشهای پیگیر از آن آقای گدارد پس از سال ۱۹۲۰ است ـ سالی که موتورهای موشکی با سوخت جامد را به کناری نهاد.

در سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۲۵ در آزمایشگاه خود اثرات پروپرگولهای مایع (اکسیژن، پروپان، اتر،...) را آزمایش می‌کرد. نخستین آزمایش استاتیک یک موتور موشکی با سوخت بنزینی و اکسیژن مایع در روز ۶ دسامبر ۱۹۲۵ انجام گرفت. موتور وی مدت ۲۴ ثانیه کار کرد. در روز ۱۶ مارس ۱۹۲۶ نخستین پرواز موشکی با سوخت مایع به‌مدت ۲ و نیم ثانیه و سرعتی برابر ۱۰۰ کیلومتر در ساعت در اوبرن[1] انجام گرفت. در سالهای پس از آن آزمایشهایی بویژه در کمپ دونس[2] (ماساچوستس) انجام گرفت.

در سال ۱۹۳۲ آقای گدارد در رُزول[3] به تعدادی آزمایشهای استاتیک با یک موتور ۱۴۶ میلیمتری با سوخت اکسیژن و بنزین دست زد. این موتور را بر یک موشک سوار کردند این موشک در ارتفاع ۲۵۰۰ متری با سرعت ۱۱۸۵ کیلومتر در ساعت پرواز کرد. آقای گدارد در سال ۱۹۳۱ امتیاز اختراع هواپیمایی با موتور موشکی را به ثبت رسانید.

گدارد در سالهای ۱۹۳۸ ـ ۱۹۳۹ به یک رشته آزمایشهایی دربارهٔ تغذیهٔ موتور دست زد. در واقع وی دو سیستم اصلی تغذیه را به‌کار برد: سیستم توربوپمپ و سیستمی که برپایهٔ فشار گاز خنثی عمل می‌کرد (شکل ۱۰۰).

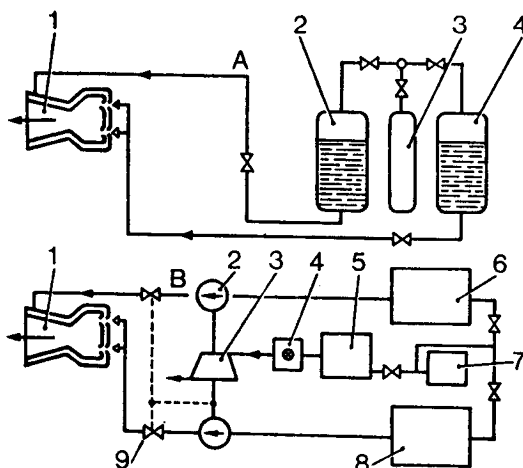
وی پس از اینکه در آغاز از تلمبه استفاده کرد و بعد از فشار گاز نیتروژن، در سال ۱۹۳۹ به‌روش تغذیه با تلمبه، که دو کیلوگرم اکسیژن و ۱/۵ کیلوگرم بنزین در هر ثانیه می‌سوزانید نیروی رانشی موتور را به ۳۱۸ کیلوگرم رسانید.

طولانیترین مدت کار در زمان آزمایشهای استاتیک در ۱۱ ژوئن ۱۹۴۰ انجام گرفت و آن ۴۲ و ۰/۵ ثانیه بود و بزرگترین نیروی رانشی در ژانویه ۱۹۴۱ که ۴۴۷ کیلوگرم بود. پس از این تاریخ آزمایشها در زمان جنگ شتابان شدند. گدارد در سال ۱۹۴۳ با همهٔ کارکنان خود به آناپولیس (مریلند) منتقل شد تا در آنجا موشکی با سوخت مایع برای برخاستن هیدراویون (هایدروپلین، هواپیمایی که می‌تواند روی آب فرود آید یا از روی آن برخیزد) از روی آب بسازند.

علاوه‌بر تسیولکوفسکی و گدارد، موشکهای جدید دو پایه گذار بزرگ دارند: اسنو ـ پلتری و هرمان اوبرت[4]. در فرانسه، اسنو ـ پلتری در سالهای ۱۹۲۹ ـ ۱۹۳۱ کاربرد بنزین و اکسیژن مایع، بعد پروکسید نیتروژن و بنزین، سرانجام تترانیترومتان و اکسیژن مایع را آزمایش کردند. این دوره برای به‌دست آوردن نتایج قابل استفاده هنوز بسیار زود بود.

---

1. Auburn 2. Camp Devens 3. Roswell 4. H. Oberth

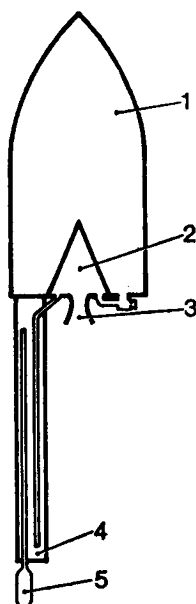


شکل ۱۰۰. دو سیستم اصلی تغذیهٔ موشک با سوخت مایع.
A: تغذیه بوسیلهٔ گاز متراکم؛ ۱. محفظهٔ احتراق؛ ۲. مخزن سوخت؛ ۳. مخزن گاز متراکم؛ ۴. مخزن سوزا.
B: تغذیه بوسیلهٔ تلمبه؛ ۱. محفظهٔ احتراق؛ ۲. تلمبهٔ تغذیه؛ ۳. توربین گازی؛ ۴. دستگاه گازساز؛ ۵. مخزن هیدروژن پراکسید؛ ۶. مخزن سوخت؛ ۷. مخزن گاز متراکم؛ ۸. مخزن سوزا؛ ۹. مکانیسم رگلاژ.

شروع سلسله موشکهای آلمانی: آقای هرمان اوبرت در شهر سیبییو[1] (در رومانی) زاده شد، اما نوشته‌ها و بیشتر تحقیقات خود را در آلمان انجام داده است. وی در ۱۹۱۷ به وزیر جنگ آلمان پیشنهاد ساخت موشکی با برد زیاد و سوخت مایع برای بمباران دشمن ارائه داد. در سال ۱۹۲۰ نخستین اثر خود را منتشر کرد که با نام «موشک در فضاهای کیهانی» هنوز شهرت دارد و دومین اثر را در ۱۹۲۹ با عنوان «مسیر سفرهای فضایی» انتشار داد. این دو اثر نه‌تنها از نظر اندیشهٔ مندرج در آنها در زمینهٔ فضاپویی و موشک مهم می‌باشند بلکه به‌علت علاقه شدیدی که نسبت بدین رشته در دانشمندان برانگیختند نیز ارزش فراوان دارند.

آقای اوبرت که بیشتر نظریه‌پرداز بود تا تجربه‌گر، بیش از چند موشک نساخت. در سال ۱۹۳۰ یک موتور تجربی کوچکی به نام Kegeldüsé ساخت که محفظهٔ احتراق آن بخوبی کار می‌کرد و از آزمایش در کار استاتیکی بخوبی برآمد. اوبرت در همان سال برای چندین سال به‌عنوان استاد ریاضی به رومانی بازگشت.

1. Sibiu



شکل ۱۰۱.موشک میراک ۱.
۱. مخزن اکسیژن مایع؛ محفظهٔ احتراق؛ ۳. شیپورهٔ پرتاب؛ مخزن بنزین؛ ۵. مخزن گازکربنیک تحت فشار.

در آلمان متفننین در موشک‌سازی و فضاپویی در سال ۱۹۲۷ تشکیل جمعیت مسافران فضایی[1] را دادند که در سال ۱۹۲۹ اوبرت به ریاست آن برگزیده شد و روزنامه Die Rakete را منتشر ساخت.

پس از بازگشت اوبرت به رومانی، شاگردان و همکاران وی، بویژه آقایان: رودلف نبل[2]، کلاوس ریدل[3]، ویلی لای[4] و ورنر فون براون[5] به مطالعات خود روی موشکهای با سوخت مایع ادامه دادند. آنان موشکهای II و $Mirak\ I$ را ساختند که موتورهای آنها از مس بود و از سوخت اکسیژن مایع و بنزین استفاده می‌کردند. کار تغذیه این موتورها با فشار گازکربنیک انجام می‌گرفت و خنک شدن آن با قرار داشتن موتور در مخزن اکسیژن مایع تأمین شده بود (شکل ۱۰۱).

در آزمایش کارهای استاتیک در سال ۱۹۳۱، موتور میراک ۱۱ در مدت ۱۲ ثانیه، ۳۰ کیلوگرم

1. Verein für Raumschiffahrt 2. R. Nebel 3. K. Riedel 4. Willy Ley 5. Wernher von Braun

نیروی رانشی داشت. هر دو میراک سرانجام در جریان آزمایشها به‌علت نقص در سیستم خنک‌سازی آنها که به‌اندازهٔ کافی حرارت را جذب نمی‌کرد منفجر شدند. موتور جدیدی از آلومینیم مجهز به سیستم خنک‌سازی با جریان آب ساخته شد. این موتور روی موشک *Repulsor 1* گذاشته شد. این موشک در ۱۴ ماه مه ۱۹۳۱ پرتاب شد و دومین موشک اروپایی بود که با سوخت مایع پرواز کرده بود. پس از آن موشک ساخت یوهانس وینکلر[1] بود که با مخلوطی از متان و اکسیژن مایع به‌عنوان سوخت پرواز کرد. این موشک در ۱۴ مارس ۱۹۳۱ در دسائو[2] در جنوب‌غربی برلین تا ارتفاع ۳۰۰ متری بالا رفت. در سالهای ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ چندین موشک از نوع رپولسور پرتاب شدند. در سال ۱۹۳۲ ارتش تحقیقات کشوری را در این زمینه قدغن کرد و آن را در فهرست کارهای سری ارتش گنجانید.

آقای ورنر فون براون، کارشناس نامبردار موشک به بررسی‌های خود در این رشته به‌عنوان رسالهٔ دکترا که مربوط به پدیده‌های احتراق در موتورهای موشکی بود ادامه داد. وی در میدان محصور و نظامی مخصوص آزمایشهای پرتاب در شهر کومرسدورف[3] به‌کار خود ادامه داد و سکوهای پرتاب کاملترین موشک زمان جنگ، موشک معروف V2 در آنجا مستقر شدند.

موشکهایی که در کومرسدورف ساخته شدند سوختی از الکل و اکسیژن مایع داشتند و برای اینکه خنک شوند، محفظهٔ احتراق آنها در ته مخزنی دو قسمتی گذاشته می‌شد؛ هر قسمت این مخزن محتوی یکی از دو جزء سوختی بود و یک بطری از نیتروژن متراکم هرکدام را تحت فشار قرار می‌داد. نخستین موشک این سری، A1، منفجر شد و سری دوم، A2، در دسامبر ۱۹۳۴ پرتاب شد. این سری تا A5 با موتورهای قویتر و با شکلهای کمی متفاوت ادامه یافت.

در این سری، موشک A4 که در سالهای ۱۹۴۰ ـ ۱۹۴۱ با موتور قویتری مجهز شده بود، همان موشک معروف V2، نخستین موشک زمین ـ زمین که در سپتامبر ۱۹۴۴ ارتش آلمان آن را به‌کار برد.

موشک V2، آغاز صفی طولانی: مأمور ساخت موتور V2 آقای والتر تیل[4] بود که در بمباران سال ۱۹۳۴ در پینموند[5] کشته شد. موتور این موشک از نوع قبلی بود. مواد سوختی بوسیلهٔ دو تلمبه که یک توربین آنها را فعال می‌ساخت وارد محفظهٔ احتراق می‌شدند و گازهای یک گازساز

1. Y. Winkler 2. Dessau

۳. Kummersdorf: محلی در پینموند واقع در مشرق آلمان.

4. Thiel W.

۵. Peenemünde: بندری در مشرق آلمان در دهانهٔ رودخانه پینه به دریای بالتیک.

کمکی که از پروکسیدهیدروژن استفاده می‌کرد، توربین را می‌گرداند. سرعت پرتاب گازها در هر ثانیه ۲۱۳۵ متر بود و نیروی رانشی موتور در سطح دریا ۲۵۰۰۰ کیلوگرم. این موتور حدود ۷۰ ثانیه کار کرد. این موتور توانست با سرعت متوسط ۷۰۰ متر در ثانیه، یعنی دو برابر سرعت صوت، پرواز کند. اشتعال این موتور به‌روش پیروتکنیک، با چرخدنده‌ای که در یک قاب سبک درون محفظهٔ احتراق سوار شده بود، انجام می‌گرفت (شکل ۱۰۲).

نخستین آزمایش پرواز *V2* در ۱۳ ژوئن سال ۱۹۴۲ بود. در سومین آزمایش که در ۳ اکتبر بود، و نخستین موفقیت این موشک به‌شمار می‌رود، موتور حدود یک دقیقه کار کرد. این کاملترین موتور موشکی بود که تا این زمان ساخته شده بود و پس از پایان جنگ، تکمیلهای موتورهای موشکهای امریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق برپایهٔ آن انجام گرفت. موشک V2 در سپتامبر ۱۹۴۴ از نظر جنگی قابل استفاده بود.

طرحهای دیگری از موتورهای تقلیدی از *V2* را گروه مستقر در پینموند برای موشکهای سری *A* (از *A6* تا *A11*) پیشنهاد کردند، اما ساخته نشدند. دو طرح آخری آنها *A10* و *A11* موشکهایی به‌ترتیب دو و سه مرحله‌ای بودند.

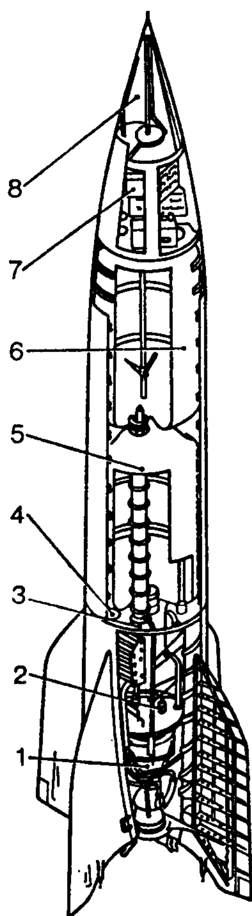
چند سال پیش از آن، آقای فون براون وگروه وی موتوری با سوخت الکل و اکسیژن مایع ساخته بودند که نیروی کششی آن ۱۰۰۰ کیلوگرم بود و با یاری آقای ارنست هاینکل در سال ۱۹۳۵ روی هواپیمایی *He-112* نصب شد. نخستین پرواز این هواپیما در ۱۹۳۷ موفقیت‌آمیز بود. این موتور با واپسزنی ارگولها[۱] تغذیه می‌شد و مخازن آن را یک گاز تحت فشار قرار می‌داد. اما در آغاز سال ۱۹۳۹ تغذیه بوسیله تلمبه انجام گرفت. در پاییز آن سال، طرح هواپیماهای موشکی کنار نهاده شد. گروه پینموند موتورهایی با سوخت اکسیژن مایع و الکل رقیق ساخت. از این موتورها که نیروی رانشی آنها یک تن بود. برای از زمین برخاستن هواپیماهای بمب‌افکن *He-111* و *Ju-88* استفاده می‌شد.

شمار دیگری از موشک‌سازان آلمانی نیز در تکامل موشکهای دارای سوخت مایع، سهم عمده‌ای داشتند، که از آن میان می‌توان از آقای یوگن زنگر[۲] اتریشی و هلموت والتر شیمیدان نام برد.

آقای یوگن زنگر در سال ۱۹۳۳ سیستم تازه‌ای از خنک‌سازی ابداع کرد که به سیستم «خنک‌سازی با بازیابی گرما» شهرت یافت و بعدها رایجترین سیستم خنک‌سازی شد. در این سیستم، عامل خنک‌کننده، خود پروپرگول است که در لفافی که دور محفظهٔ احتراق و شیپوره را

۱. ergol، نوعی سوخت موشک.ـم.

2. Euge Sänger



شکل ۲ ۱۰.موشک V2.

۱. موتور موشک؛ ۲. انژکتورها؛ ۳. توربو پمپها؛ ۴. مخزن پروکسیدهیدروژن؛ ۵. مخزن اکسیژن مایع؛ ۶. مخزن سوخت؛ ۷. مکانیسم کنترل؛ ۸. سر منفجرشونده.

گرفته است گردش می‌کند.

برتری این سیستم در این است که پروپرگول پس از اینکه گرم شد با دمای بالا وارد محفظهٔ احتراق می‌شود بازده احتراق بالا می‌رود. وانگهی مخزن لازم برای ماده خنک‌کننده نیز حذف می‌شود.

آقای یوگن زنگر نوعی موتور موشکی ساخت که سوخت آن عبارت بود از روغن سنگین و اکسیژن گازی؛ و ۲۳ کیلوگرم نیروی رانشی ایجاد می‌کرد. این موتور مدت ۲۰ دقیقه کار کرد. او همچنین سوختهای به‌اصطلاح «فلزی» مانند گرد آلومینیم در حالت تعلیق در روغنهای سنگین و اوزون مایع را آزمایش کرده است.

یوگن زنگر در مدت جنگ کوشید تا برای برخاستن هواپیما از زمین موتورهای موشکی با سوخت مایع بسازد و از سال ۱۹۴۲ به بعد وقت خود را وقف بررسی پولسوراکتورها کرده است.

موتور تک‌ساخت: در تک‌ساخت چنانکه از نامش فهمیده می‌شود انرژی واکنش از یک ماده یا مخلوطی از مواد محتوی سوخت و سوزا همراه یکدیگر، گرفته می‌شود.

نوعی موتور موشکی تک سوختی را هلموت والتر، شیمی‌دان آلمانی ساخته است. در این موتورها، انرژی بوسیلهٔ تجزیهٔ گرمازای پروپرگول، پروکسیدهیدروژن (آب اکسیژنه) به‌دست می‌آید، کاتالیزورهایی مانند اسفنج پلاتین، خاکهای کمیاب، پرمنگنات این تجزیه را شدت می‌دهند. وانگهی سوختها، تنظیم‌پذیر هستند و به‌آسانی ساخته می‌شوند. گرچه بازده آنها زیاد بالا نیست و درصد مصرف آنها زیاد است (برای هر کیلوگرم نیروی رانشی موشک، ۳۵ کیلوگرم سوخت لازم است). فراورده‌های تجزیه، گرمای کمی دارند و بنابراین می‌توان از آنها برای فعال کردن توربینهای گازی استفاده کرد.

آقای هلموت والتر، یک موتور موشکی را که سوخت آن پروکسیدهیدروژن با غلظت ۸۰ ـ ۸۵٪ بود آزمایش کرد. موفقیت این موتور چنان بود که در سال ۱۹۳۵ برای ساخت آن کارگاه خاص برپا شد. در سال ۱۹۳۷ موشکی ساختهٔ والتر با نیروی رانشی ۱۰۰ کیلوگرم برای برخاستن یک هواپیمای *Heinkel Kadette* از زمین به‌کار رفت و این نخستین خیزش هواپیما با کمک موشک در تاریخ هواپیمایی است.

موتور با سوخت آب اکسیژنه در زمان جنگ به‌عنوان موتور هواپیمای موشکی کاربرد زیادی داشت. موتوری با ۳۰۰ کیلوگرم نیروی رانشی در سال ۱۹۴۰ روی هواپیمای *DSF 194* (طرح دلتا سال ۱۹۳۲ آلکساندر لیپیش[1]) گذاشته شد و این هواپیما بسرعت ۵۵۰ کیلومتر در ساعت

1. A. Lippisch

دست یافت. در سال ۱۹۴۱ هواپیمای مسرشمیت *Me-163A* جانشین آن شد و سرعت به ۱۰۳۰ کیلومتر در ساعت رسید و سرانجام تعداد زیادی هواپیمای مسرشمیت و یونکرس با این موتور مجهز شدند. موتورهای والتر برای پیش راندن موشکهای زمین ـ هوا (Hecht) یا هوا ـ زمین (H5) و اژدرها به‌کار گرفته شدند.

تحقیقات روی پروپرگولهای مایع: مؤسسات و شرکتهای دیگر آلمانی با انواع سوختهای مختلط آزمایشهایی کردند. آنها بویژه می‌کوشیدند تا سوزا، اکسیژن مایع، را با اسیدنیتریک عوض کنند. دشواری اساسی درکاربرد اکسیژن مایع، نقطهٔ جوش آن ۱۸۲ ـ درجهٔ صدبخشی بود که عایقکاری مخازن بزرگ را الزام‌آور می‌ساخت.

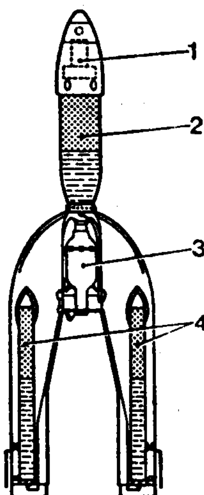
در سال ۱۹۳۸ کارخانهٔ BMW موتوری با ۹۰٪ اسیدنیتریک و ۱۰٪ اسیدسولفوریک به‌عنوان سوزا و آمیزه‌ای از اتر، ایزوبوتیل وینیل و آنیلین، معروف به ویزول[1]، به‌عنوان سوخت تولید کرد. در سالهای ۱۹۳۳ ـ ۱۹۳۴ این نوع موتور را بر موشکهای زمین ـ هوای شمترلینگ[2] و واسرفل[3] سوار کردند.

در ممالک متحدهٔ امریکا، علاوه‌بر آزمایشهای گدارد، که به تنهایی کار می‌کرد، تحقیقات دیگری روی موتورهای موشکی به همت پژوهش‌گران و شرکتهای متعدد در چارچوب برنامه‌های گوناگون به‌عمل آمد. از آن جمله American Interplanetary Society (AIS) با سرپرستی آقای فرانکلین پیرس[4] انواعی موتورهای موشکی طرح کرد. نخستین این موتورها که در سال ۱۹۳۲ ساخته شد تقلیدی از موشک آلمانی *Mirak* بود. این موتور که از آلومینیم ساخته شده و کمی بزرگتر از میراک بود، ۱۵ سانتیمتر طول و ۷/۵ سانتیمتر قطر داشت. این موتور با بنزین و اکسیژن مایعی که با فشار یک گاز خنثی به محفظهٔ احتراق رانده می‌شد، کار می‌کرد. محفظهٔ احتراق با آب خنک می‌شد. این موتور هم درکار استاتیکی و هم به‌شکل موشک، از عهدهٔ آزمایش بخوبی برآمد.

تحقیقات پراکنده کوششهای بنیادی AIS در جهت ساخت سیستم خنک‌سازی متمرکز شده بود، حدود سال ۱۹۳۸، زمانی‌که جیمز هـ. وایلد[5] موتور معروف به «موتور لوله‌ای گرمسازِ خود خنک شده» را ساخت سیستم «بازیابی گرما» یا رژنراسیون مطرح شد. در سال ۱۹۳۳ آقای هری و. بُول[6] روی این سیستم آزمایشهایی ـ اما تنها برای گردنه شیپوره ـ انجام داده بود (شکل ۱۰۳).

سازمان دیگری Cleveland Rocket Society با سرپرستی آقای ارنست لوبل[7] دو موتور ساخت: یکی از آلیاژ نیکل کرومی فولاد که با آب خنک می‌شد؛ دیگری از آلیاژ سبک که با ارگولها

1. visol 2. Sehmetterling 3. Wasserfall 4. F. Pierce 5. J. H. Wyld 6. Harry Bull 7. E. Loebell



شکل ۱۰۳.موشک AIS.۱. خرج مفید؛ ۲. مخزن سوخت؛ ۳. محفظهٔ احتراق؛ ۴. مخزن سوزا.

(بنزین و اکسیژن مایع) خنک می‌شد.

در آستانهٔ آغاز جنگ جهانی کوششهای متعددی بوسیلهٔ گروه‌های دیگری از کارشناسان، گروه هری و. بُول، گروه نیثن کارور[1]، رابرت س.ترواکس[2] به‌عمل آمد. هستهٔ اصلی این کوششها ایجاد امنیت کار محفظهٔ احتراق بود و برای این کار مواد عایقی در نظر گرفته شد تا مرحلهٔ خنک‌سازی از بین برده شود و انواعی از پروپرگولها نیز مورد آزمایش قرار گرفتند. امریکاییها نیز مانند آلمانیها برای تعویض اکسیژن مایع با سوزاهای دیگر و دقیق‌تر بگوییم با اسیدنیتریک همراه با آنیلین، کوشیدند. آقای استیف[3] یکی از همکاران ترواکس در سال ۱۹۴۲ این آمیزه را که پروپرگول هیپرگولیک نامیده شد، برای نخستین بار به‌کار گرفت.

در زمان جنگ در ممالک متحدهٔ امریکا، کوششهای عمده در جهت ساخت موتورهای موشکی جهت برخاستن هواپیماها از زمین و شتابانیدن آنها بود. آقای گدارد در ساخت موتوری با سوخت بنزین و اکسیژن مایع کمک کرد. نخستین آزمایشهای پروازی در آوریل ۱۹۴۲ انجام گرفت.

مؤسسه Reaction Motors Society که آمریکن راکت سوسایتی آن را در سال ۱۹۴۱ احداث کرده بود نیز چند موتور موشکی برای خیزش هواپیماها با سوخت بنزین و اکسیژن مایع

1. Nathan Carver 2. R. C. Truax 3. Stiff

ساخت که نیروی رانشی آنها به ۱۳۰۰ کیلوگرم و مدت کار آنها به ۶۰ ثانیه رسید. در سال ۱۹۴۳ این موتورها در آزمایشها موفق بودند.

در اتحاد شوروی سابق، کار تسیولکوفسکی به‌جریان آزمایشها حرکتی داد. در سال ۱۹۲۴ برای بررسی مشکلات موشکها یک دبیرخانه و برای بررسی پروازهای کیهانی اداره‌ای تأسیس شد.

دو پژوهشگر روسی با نامهای فریدریک آرتوروویچ تساندر[۱]، نخست با بنزین و هوا، سپس بنزین و اکسیژن مایع و آقای پتروویچ گلوسکو[۲] با تولوئن و تتروکسیدنیتروژن، سپس با نفت سفید و اسیدنیتریک انواع زیادی موتورهای موشکی را آزمایش کردند. در اینجا هم مشکلاتی که باید برطرف می‌شدند اصولاً عبارت بودند از خنک‌سازی موتور و افزایش نیروی رانشی آن.

موتورهای آقای گلوسکو برای پرتاب موشکهای زمین ـ هوا، با نیروی رانشی ۱۵۰ کیلوگرم، یک بمب پرنده و یک موشک ویژه هواپیما با نیروی رانشی، ۱۷۵ کیلوگرم بودند. در سال ۱۹۳۷ گلوسکو موتورهایی با سوخت نفت سفید و تترانیترومتان ساخت که به‌ترتیب ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرم نیروی کششی آنها بود.

مخفیکاری ویژه زمان جنگ در مورد موتورهای موشکی، در شوروی هنوز به قوت خود باقی است و حتی اطلاعات مربوط به گذشته نسبتاً دور هم انتشار نمی‌یابند.

تحقیقات فرانسه به‌طور نامنظم بدون اینکه به ساختهای مشخصی منجر شوند ادامه داشت. در زمان اشغال فرانسه بوسیلهٔ ارتش آلمان، آقای باره[۳] موتوری با سوخت اتر نفتی و اکسیژن مایع را تحقیق می‌کرد. آزمایش کار استاتیکی این موتور در نوامبر ۱۹۴۱ در نزدیکی لیون به‌عمل آمد. قدرت این موتور را می‌شد با کم و زیاد کردن مقدار پروپرگول مصرفی تنظیم کرد. این موتور را سوخت آن خنک می‌کرد و با وارد آوردن فشار روی مخزنها به توسط نیتروژن، تغذیه می‌شد.

تحقیقاتی هم قبل از جنگ جهانی دوم یا در طی آن در دیگر کشورها انجام گرفته است. کهن‌ترین آنها، تحقیقات کلی مؤسسهٔ کروکو[۴] در ایتالیا بود که از سال ۱۹۲۷ آغاز گشت و در سال ۱۹۳۵ به‌علت فقدان بودجه پایان گرفت. آقای آیزک لابک[۵] در بریتانیای کبیر در سال ۱۹۴۲ توانست موتوری با سوخت بنزین و اکسیژن مایع را پرواز دهد. ژاپنیها هم در زمان جنگ موتورهایی از نوع تک سوخت با پروکسیدهیدروژن ساختند که مدت ۷۵ ثانیه نیروی رانشی آن ۲۰۰ کیلوگرم

۱. فریدریک آرتوروویچ تساندر، ۱۸۸۷ـ۱۹۳۳ متولد ریکا یکی از آتشفشانهای پشت ماه به نام وی نامگذاری شده است.

۲. والنتین پتروویچ گلوسکو(۱۹۰۸ـ) به‌مناسبت کارهایش سه بار نشان لنین، یک بار نشان انقلاب اکتبر، یک بار نشان پرچم سرخ کار و چندین مدال گرفته است.

3. Barré 4. Crocco 5. Isaac Lubbock

بود. از این نوع موتورها هم در موشکها و هم در هواپیماهای ویژهٔ خودکشی (کامیکازه) استفاده کردند.

نتایج گرفته شده: این چند نمونه نشان می‌دهند که محققان پراکنده همگی در یک زمان به همان نتایجی رسیدند که چندین سال پیش از آن در کشوری نظیر آلمان به‌دست آمده بودند. این امر جنبهٔ پراکنده و حتی گهگاهی تحقیقاتی را تأیید می‌کند که بدلایلی که گفته شد همچون تقریباً دیگر زمینه‌های آفرینش تکنیک، نشر بین‌المللی نداشته است.

بااین‌حال، باید به یاد آوریم که در برههٔ یک چهارم سده که فاصلهٔ آغاز کارهای گُدارد و پایان جنگ جهانی دوم را پر می‌کند، انواع اصلی موتورهای موشکی با سوخت مایع و اصول کلی ساخت آنها، اختراع و به‌کار رفته‌اند. این را هم باید بگوییم که این آفرینش، نتیجهٔ یک رشته کارهای تجربی است همچنانکه اختراع انواع دیگر موتورهای درونسوز نیز چنین بوده است.

خصلت تجربی این رفتار، بویژه در زمینه پروپرگولها به چشم می‌خورد که ویژگیهای شیمیایی و فیزیکی آنها را باید در محدوده‌ای نسبتاً تنگ در نظر داشت. هنوز هم دامنهٔ گوناگونی پروپرگولها کاملاً گسترده است و این وضع بخوبی نشان می‌دهد که قاعدهٔ کمترین زیان، چه در مورد به‌کارگیری فراورده‌ها و رهبری واکنش در محفظهٔ به‌اصطلاح احتراق و چه در زمینهٔ بازده، با قدرت حکم فرماست. دربارهٔ بالا بردن بازده، باید گفت که پژوهشهای بسیار دقیقی برای تعیین شکل و اندازهٔ محفظه و شیپوره و نوع موادی که در ساخت این موتورها به‌کار گرفته می‌شوند انجام گرفته‌اند.

دشواریهای دیگر کار نیز در این دوران برطرف شده‌اند. گرچه این دشواریها مربوط به سیستمهای کمکی موتورهای موشکی است، برای کار آن اساسی می‌باشند: مکانیزم تزریق، تغذیه، خنک‌سازی و بالاخره اشتعال. مثلاً برای تغذیه، هر دو روش اصلاح‌شدهٔ ابتکاری آقای گدارد به‌کارگرفته شدند: رانش به‌کمک ذخیرهٔ گازهای بی‌اثری که فشرده شده‌اند، یا جریان دادن بوسیلهٔ توربو پمپها یا تلمبه‌های توربینی.

موشکهای ماهواره‌بر

تاریخ موتورهای موشکی از زمان جنگ جهانی دوم، اصولاً در امریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق و . . . و در مقیاس کمتری در اروپای غربی به بخشهای موشکها، ماهواره‌ها، موشکهای هواشناسی و هواپیماها محدود می‌شود.

آغاز کار با درگیری جنگ، در آلمان با موشکهای V2 بود و طرحهای عملی ناشده‌ای از نوع

A6 تا A11 تهیه شدند. همه اصول ساختمانی از محفظهٔ احتراق گرفته تا سیستمهای کمکی، پیش از این تاریخ شناخته شده بودند.

پیشرفتهای پس از جنگ موشکها، اساساً در چند نکته خلاصه می‌شوند. موتورهایی با توان روزافزون و طول کاری فزاینده، در پرتو کاربرد مصالح تازهٔ ساخت و بررسی اشکال و ابعاد محفظهٔ احتراق و سرانجام کاربرد موشکهای جدید چند مرحله‌ای.

پروپرگولهای جدید بویژه برای حذف اکسیژن مایع، که نمی‌شد آن را انبار کرد، پذیرفته شدند، و به مرحله‌ای رسیدند که توانستند طبق دلخواه خود، مقدار نیروی رانشی موتورهای موشکی را با تغییر مقادیر سوخت با وسایل معمولی کم و زیاد کنند.

امکان روشن و خاموش کردن مکرر موتور در فضاهای بالای جوّ، که برای اجرای برنامه‌های فضایی لازم بود نیز به‌دست آمد.

در ممالک متحدهٔ امریکا، در دوران پس از جنگ، رقابت میان نیروهای زمینی، دریایی و هوایی، انگیزهٔ تحقیقاتی بود که به‌طور کاملاً جداگانه و گاهی موازی با یکدیگر در سه سازمان انجام می‌گرفت.

ترقی موشکهای امریکایی: در محدوده برنامهٔ هرمسِ نیروی زمینی، که شامل ساخت موشکهای غول‌پیکر بود، پس از چند آزمایش با موشکهای V2 مصادره شده، نخستین موشک چند مرحله‌ای با نام *Bumper* ساخته شد؛ این موشک در واقع همان V2 بود که با موشک کوچکی با نام *Wac-Corporal* با سوخت مایع مجهز شده بود. بعداً نمونه‌های جدیدی از موتورها آزمایش شدند. یک موتور موشکی که باز از V2 الهام گرفته شده بود سوختی از الکل و اکسیژن مایع داشت. نیروی رانشی این موشک ۶۱۰۰ کیلوگرم پیش‌بینی شده بود و در سالهای ۱۹۴۸ ـ ۱۹۴۹ بوسیلهٔ جنرال‌الکتریک برای موشک هرمس *A1* برای کارهای استاتیک آزمایش شد. بعداً، در سال ۱۹۲۵ که برنامه هرمس متوقف و برنامهٔ Redstone به اجرا گذارده شد، نوع اصلاح‌شدهٔ آن ۸ تا ۱۰ تن نیروی رانشی داشت.

موتورهای دیگری هم که از V2 الهام گرفته شده بودند جهت موشکهای فضاپیما ساخته شدند. در اکتبر سال ۱۹۴۸ مؤسسه Reaction Motor Incorporated توانست موتوری با سوخت اکسیژن مایع و الکل، به تقلید از V2 بسازد. این موتور جهت موشک فضاپیمای وایکینگ بود که طی ۶۶ ثانیه ۹۵۰۰ کیلوگرم نیروی رانشی ایجاد می‌کرد. در ماه مه ۱۹۴۹ موشک وایکینگ ۱ به فضا پرتاب شد و به ارتفاع ۸۰ کیلومتری رسید. بعداً این موتورها تکمیل شدند و انواع متعددی وایکینگ

تا وایکینگ ۱۴ تا ماه مه ۱۹۵۷ پرتاب شدند. موشک وایکینگ بزرگترین موشک هواشناسی بود که در امریکا ساخته شده بود. موشکهای هواشناسی دیگری با پروپرگول مایع به گروه *Aerobee* تعلق داشتند.

یکی از مهمترین موتورهای ساخته‌شدهٔ پس از جنگ، موتوری بود که شرکت راکت دین[1] برای نیروی هوایی در چارچوب برنامهٔ Navaho ساخت. این موتور ۶۰ تن نیروی رانشی ایجاد کرد، سوخت آن اکسیژن مایع و الکل اتیلیک بود. در جریان این برنامه یک موشک ۱۳۵ تنی ساخته شد که پس از اینکه به یاری سه موتور موشکی با نیروی رانشی ۶۰ تن از زمین برخاست بوسیلهٔ یک استاتو رآکتور پرواز کرد. این موتور بعداً جهت ساختن موشک *Redstone* به‌کار گرفته شد و پس از آن در ردیف موتورهای تکمیل شده موشکهای *Jupiter*، *thor* و *Atlas* همچنین موشک ماهواره‌بر *Saturn* گذاشته شد.

موشکهای جوپیتر نخستین موشکهای بالیستیک با برد متوسط ساخت امریکا بودند. تغییراتی در این موتور داده شد تا با سوخت نوین ارگول، هایدین (Hydyn)، آمیزه‌ای از دی‌متیل‌هیدرازین نامتقارن و دی‌اتیلن‌تری‌آمین تطبیق کند و نیروی رانشی آن افزایش یابد.

باز باید گفت، به رداستون، دو مرحله اضافه شد. مرحلهٔ دوم شامل ردیفی از یازده موشک و مرحلهٔ سوم دارای سه موشک بود که همگی سوخت جامد داشتند. آزمایشهای اولیه در سپتامبر ۱۹۵۶ انجام گرفت.

نیروی هوایی امریکا کوششهای خود را در سال ۱۹۵۴ روی برنامهٔ اتلس متمرکز ساخت، اما در سال ۱۹۷۵ به برنامهٔ Navaho پیوست. موشک اتلس نخستین موشک بالیستیک قاره‌پیمای ممالک متحده امریکا بود که سه موتور آن را پیش می‌برد که یک موتور اصلی در مرکز و دو موتور شتاب‌دهنده با اکسیژن مایع و نفت سفید کار می‌کردند. ساخت این موشک اول ژوئن سال ۱۹۵۵ تا اوت ۱۹۶۱ طول کشید.

موتورهای اتلس E که آخرین این موتورها بودند در موتورهای شتاب‌دهنده، نیروی رانشی برابر ۱۵۰ تن و در موتور مرکزی ۲۶ تن ایجاد می‌کردند. موشکهای اتلس امکان اشتعال در ارتفاع زیاد موتورهای موشکی را به‌وجود آوردند. با ساخت موتور اتلس، روش تازه‌ای در موشک‌سازی پایه‌گذاری شد: ساخت همزمان؛ منظور از همزمانی، ساخت و آزمایش هم‌زمان انواع گوناگونی از یک جزء موشک است. هزینهٔ این کار، گرچه زیاد بود در زمان صرفه‌جویی می‌شد.

همراه با ساخت موشکهای اتلس، موشکی با برد متوسط در سال ۱۹۵۷ ساخته شد، موشک

1. Rocketdyne

تایتن ۱ که در ژانویه ۱۹۵۹ ساخت آن به پایان رسید. این موشکی دو مرحله‌ای بود که مرحلهٔ دوم آن، در ارتفاعات زیاد، پس از خاموش شدن اولی، روشن می‌شد. موشک تایتن *1* مانند موشکهای اتلس و ثور به‌عنوان سوزا از اکسیژن مایع استفاده می‌کرد و بنابراین انبارکردن آنها میسر نبود.

ساخت موشک تایتن *11* در مارس ۱۹۶۲ به پایان رسید، نخستین مرحلهٔ این موشک، رانشی برابر ۱۹۵ تن داشت و مرحلهٔ دوم، ۴۵ تن. موتورهای این موشک برای استفاده از سوخت ارگولهای انبارکردنی: دی‌متیل‌هیدرازین و هیدرازین به‌عنوان مادهٔ سوزا، پروکسید نیتروژن اصلاح شده بودند.

موشکهای ماهواره‌بر: جالبترین جنبهٔ موتورهای موشکی با سوخت مایع، از نظر تودهٔ مردم، کاربرد آنها به‌عنوان موشکهای ماهواره‌بر بود.

نخستین موشک ماهواره‌بر امریکا، موشک *Vanguard* بود که سه مرحله داشت. موتور این موشک از روی مدل موشکهای وایکینگ و آئروبی ساخته شده بود. مؤسسه جنرال‌الکتریک، موتور مرحلهٔ نخست را با سوخت اکسیژن مایع و نفت سفید ساخته بود و نیروی رانشی آن به ۱۲ تن می‌رسید. نیروی رانشی موتور مرحلهٔ دوم را که آئروجت جنرال ساخت ۳۴۰۰ کیلوگرم بود. سوخت این موتور اسیدنیتریک و دی‌متیل‌هیدرازین بود. موتور مرحلهٔ سوم را شرکت گراندسنترال راکت ساخت، با سوخت جامد کار می‌کرد و رانش آن ۱۳۰۰ کیلوگرم بود. نخستین پرتاب ازکیپ کاناورال در اکتبر ۱۹۵۷ انجام گرفت. ساخت این موشک در سال ۱۹۵۹ متوقف شد. موشک ماهواره‌بر دیگری به نام *Juno 1* به‌جای آن برگزیده شد که در واقع همان جوپیتر *C* با یک مرحلهٔ اضافی بود. این موشک نخستین ماهوارهٔ امریکا را در ژانویه سال ۱۹۵۸ در مدار زمین قرار داد.

در سال ۱۹۵۸ نسل جدیدی از موشکهای ماهواره‌بر ساخته شدند. این نوع موشکها بمنظور کاربرد آنها در مرحلهٔ اول موشکهای دارای برد متوسط جوپیتر و ثور، با یک مرحلهٔ افزوده در بالا (Thor Agena, Thor Epsilon, Thor Delta, Thor Able, Juno 11)ساخته شدند.

در ماه ژوئیه ۱۹۵۸ مؤسسه ناسا[1] بمنظور جبران واپس‌ماندگی ممالک متحده امریکا در مسابقه با اتحاد جماهیر شوروی سابق برای تسخیر فضا تشکیل شد.

در سال ۱۹۵۸ موشکهای ماهواره‌بر با استفاده از موشکهای قاره‌پیمای اتلس و تایتن به میدان آمدند. موشک دو مرحله‌ای *Atlas Centaur* (موشک اتلس دارای یک مرحلهٔ بالایی سنتور) نخستین موشک ماهواره‌بری بود که از موتوری با سوخت اکسیژن و هیدروژن مایع استفاده کرد. این سوخت بسیار قوی را تسیولکوفسکی و گدارد برای مرحلهٔ دوم خود در نظر گرفته بودند.

براساس موشک تایتن *11*، موشک ماهواره‌بر تایتن *11*، عین موشک نخستین و تایتن *111*

۱. National Aeronautics & Space Administration، به معنای ادارهٔ فضاپویی و فضایی ملی.ـم.

ساخته شد. موشک اخیر متشکل بود از یک ماهواره‌بر تایتن *11* و دو موشک توأم با سوخت جامد و نیروی رانشی بیش از ۱۰۰۰ تن که در دو جانب موشک مرکزی قرار داشتند.

پرآوازه‌ترین موشکهای فضاپیمای امریکایی، سری ساترن هستند. ساترن ۱ دو مرحله‌ای بود. مرحلهٔ نخست آن را هشت موتور جوپیتر به پیش می‌راند. این موتورها گرد هشت مخزن از نوع رداستون قرار داشتند؛ این مخازن نیز بنوبهٔ خود اطراف مخزن جوپیتر را گرفته بودند. موتورهای جوپیتر اصلاح شده و دارای سوخت اکسیژن مایع و نفت سفید بودند، نیروی رانشی آنها به ۸۵ تن می‌رسید. مرحلهٔ دوم مجهز به شش موتور، هر یک با نیروی رانشی ۶۸۰۰ کیلوگرم بودند و از سوخت اکسیژن و هیدروژن مایع استفاده می‌کردند. موتورهای مرحلهٔ اول را شرکت راکت دین ساخته بود و موتورهای مرحلهٔ دوم را پرات و ویتنی[1]. این موشک درکار استاتیک از آزمایشهایی در هانتسویل[2] سربلند بیرون آمد، سپس نخستین پرتاب آن در ۲۷ اکتبر ۱۹۶۱ درکیپ‌کندی انجام گرفت.

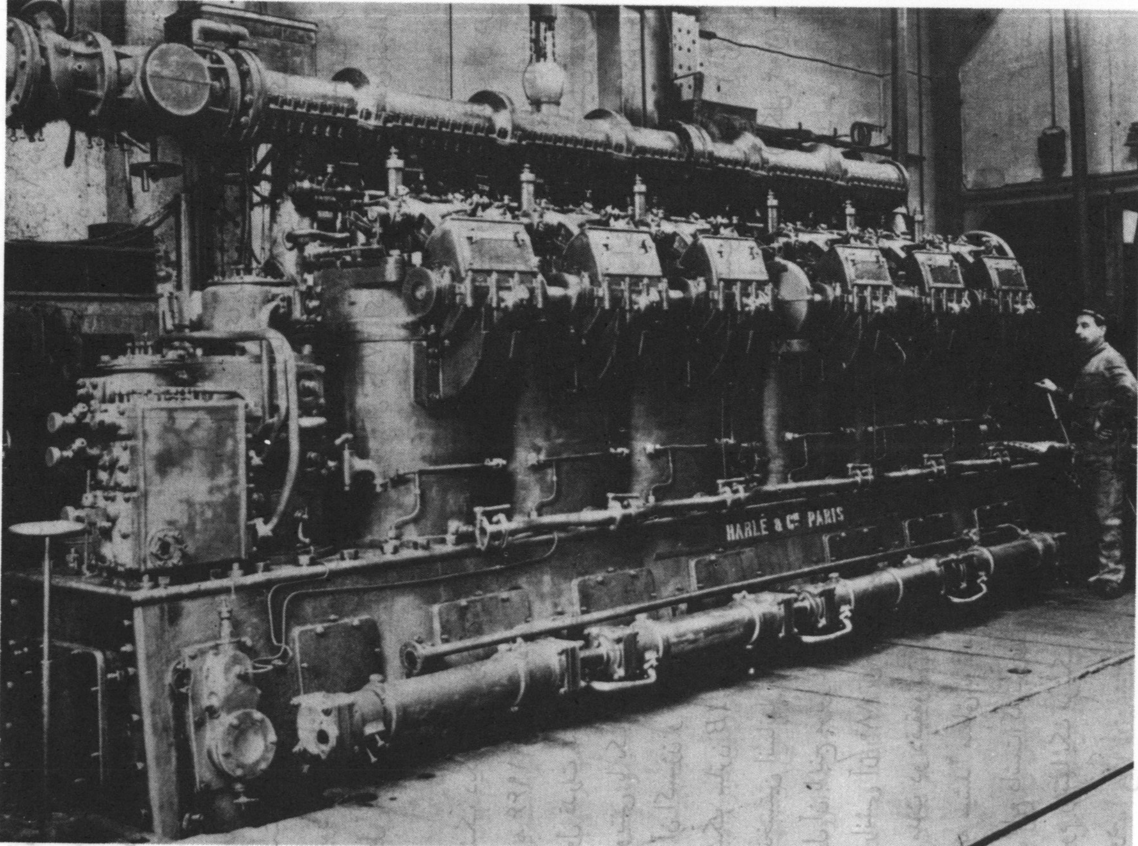
موشک دیگری از سری ساترن با نام *Saturn 1B* بعداً ساخته شد و نخستین پرتاب آن در ۲۶ فوریه ۱۹۶۶ درکیپ‌کندی انجام گرفت. موتورهای این نوع موشک با ساترن ۱ تفاوت داشتند. مرحلهٔ اول قدرت هشت موتور خود را داشت که هریک ۹۳ تن نیروی رانشی داشتند و شش موتور پرات و ویتنی با یک موتور با رانش ۹۰ تن تعویض شده بودند؛ موتور اخیر ساختهٔ راکت دین و سوخت آن اکسیژن و هیدروژن مایع بود.

موشک ساترن *1B* را می‌توان درآمدی بر موشک ساترن *V* دانست، موشکی در ۲۰ ژوئیه ۱۹۶۹ نخستین انسانها را به کرهٔ ماه برد. موشک ساترن *V* دارای سه مرحله بود (شکل ۱۰۴). مرحلهٔ اول آن با پنج موتور F-1 تجهیز شده بود. هر موتور F-1 اکسیژن مایع و نفت سفید می‌سوزاند و نیروی رانشی آن ۸۸۰ تن بود و بدین‌ترتیب مرحلهٔ اول ۴۴۰۰ تن نیروی رانشی داشت. هر پنج موتور به مدت دو دقیقه‌ونیم در هر ثانیه ۱۵ تن پروپرگول سوزانیدند. این موتورها بوسیله بوئینگ[3] درکارخانه میشد[4] متعلق به ناسا ساخته شدند. مرحلهٔ دوم آن پنج موتور J-2 با سوخت اکسیژن و هیدروژن مایع داشت، که نیروی رانشی هر موتور ۹۰ تن بود. آنها شش دقیقه و چهل ثانیه کارکردند. مرحلهٔ سوم را تنها یک موشک *J-2* به پیش راند. نخستین پرتاب این موشک غول‌آسا در ۹ نوامبر ۱۹۶۷ بود.

1. Pratt & Whitney

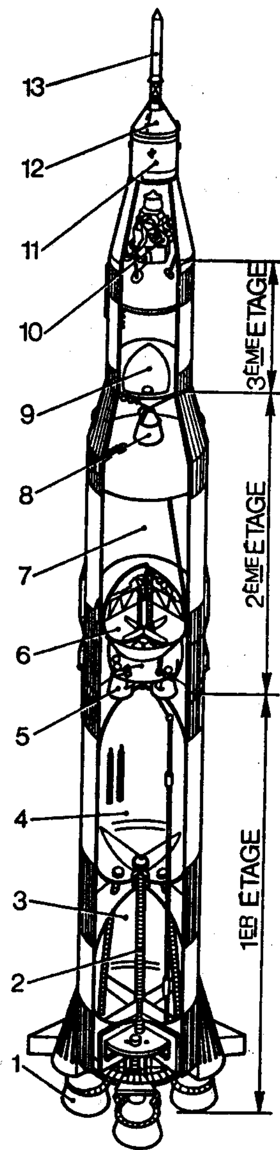
۲. Huntsville: شهری در شمال آلاباما، واقع در جنوب‌شرقی ممالک متحده امریکا.ـم.

3. Boeing 4. Michoud



تابلوی ۱۱. موتور صنعتی دیزل (حدود ۱۹۱۰).

تابلوی ۱۲. آپولوی XVII که یک موشک ساترن V آن را حمل کرده است (۱۹۷۲).



شکل ۱۰۴.موشک ساترن V.

۱. موتور F-1؛ ۲. لوله‌های اکسیژن؛ ۳. مخزن کروزن؛ ۴. مخزن اکسیژن مایع؛ ۵. موتور J-2؛ ۶. مخزن اکسیژن؛ ۷. مخزن هیدروژن؛ ۸. موتور J-2؛ ۹. مخزن اکسیژن؛ ۱۰. مدول ماه‌نشین؛ ۱۱. مدول خدمات؛ ۱۲. مدول فرمان؛ ۱۳. سیستم هدایت:

بیخبری از پژوهشهای شوروی: علاوه‌بر ممالک متحده امریکا، اتحاد جماهیرشوروی سابق نیز تعدادی موشک ساخته و پرتاب کرده است، اما ساختمان آنها هنوز سرّی مانده است و تنها با حدس و گمان در این‌باره می‌توان سخن راند.

شورویها هم مانند امریکاییها از تجربیات آلمانیها از V2 و دیگر طرحها استفاده کردند. اما شورویها بسیار زود توانستند موتور موشکیِ بسیار قدرتمند خود را بسازند. آنان بمنظور جبران عقب‌ماندگی خود در رشته سلاحهای اتمی و انتقال بارهای سنگین اتمی خود که به‌طور بدی راه‌اندازی شده بودند، ناچار از پیش بردن موشکهای خود با قدرت هرچه بیشتر بودند. چنین می‌نماید که نخستین موشک با برد متوسط شورویها در سال ۱۹۵۶، یعنی یک سال پیش از پرتاب موشکهای جوپیتر و ثور پرتاب شد.

نخستین موشک قاره‌پیمای شورویها در سال ۱۹۵۷، بیش از یک سال زودتر از پرتاب موشک اتلس بود. اتحاد شوروی در چهارم اکتبر توانست نخستین ماهوارهٔ خود را، احتمالاً با موشکی که از موشکهای قاره‌پیما به وام گرفته شده بود، در مدار زمین قرار دهد. این موشک پرآوازه با سوخت مایع Scrag نامیده می‌شد که سه مرحله‌ای با برد ۱۰۰۰۰ کیلومتر بود.

برای نخستین بار یک موشک ماهواره‌بر شوروی در سال ۱۹۶۷ در نمایشگاه هوا ـ فضایی در شهر لوبورژه[1] به نمایش گذارده شد. این همان موشک واستوک بود که پنج گروه پیشران آن را حرکت می‌دادند، که هر گروه از چهار موتور موشکی با سوخت نفت سفید و اکسیژن مایع تشکیل شده بودند. پس از موشک واستوک موشکهای بسیار نیرومندتر واسخود و سایوز ساخته شدند.

ساخت چنین موشکهایی هنوز در تیول دو ابرقدرت مانده است. تعدادی کمی از کشورهای دیگر، تا آنجا که ما می‌دانیم، خود را گرفتار چنین کارهای عظیمی کرده‌اند.

بریتانیای کبیر برای موشکهای بزرگ خود موتورهایی ساخته است. سوخت این موتورها اکسیژن مایع و نفت سفید، و نیروی رانشی آنها ۳۸ تن است. این موشک را شرکت رولز ـ رویس ساخته و اجازهٔ ساخت آن را جهت موشک با برد متوسط *Blue Streak* از راکت دین دریافت داشته بود.

فرانسه نیز چند موتور موشکی با سوخت مایع جهت هواشناسی به‌نامهای *Véronique* (با سوخت اسیدنیتریک و گازوییل) و *Vesta* با بردهای به‌ترتیب ۲۶۰ و ۴۰۰ کیلومتر، و نیز موشک ماهواره‌بر *Diamant* را که در سال ۱۹۶۵ توانست ماهوارهٔ کوچکی را در مدار زمین قرار دهد، ساخته است. مرحلهٔ اول این موشک، موتوری با سوخت اسیدنیتریک و تربانتین بود که ۱۳ تن نیروی رانشی داشت. دو مرحله بعدی آن با سوخت جامد و دارای نیروی رانشی ۸ و ۳ تن بودند.

۱. Le Bourget شهرکی در فاصلهٔ یازده کیلومتری شمال‌شرقی پاریس.ـم.

هواپیماهای موشکی: پس از جنگ جهانی دوم و به یاری معلوماتی که از تحقیقات آلمانیها به‌دست آمده بود، موتورهای موشکی در هواپیماها نیز به‌کار گرفته شدند. در ممالک متحدهٔ امریکا از سال ۱۹۴۴ تحقیقاتی در این‌باره آغاز شد. این تحقیقات روی *MX-324* که نوع پیشرفتهٔ *MX-653* بود سرانجام به ساخت هواپیمای موشکی XS-1 منجر شد.

موتور طرح Bell-X-1 را شرکت Reaction Motors ساخت. این نوعی موتور با سوخت مایع دارای چهار شیپوره بود با نیروی رانشی ۲۷۰۰ کیلوگرم. نوع دارای چهار شیپوره جداگانه به خلبان اجازه می‌داد که با راه‌انداختن یا متوقف ساختن جداگانهٔ آنها، مقدار نیروی رانشی را با مراحل ۶۸۰ کیلوگرمی، در زمانی‌که سوپاپهایی تنظیم مقدار رانش هنوز وجود نداشت، تغییر دهد. این آزمایشها در سال ۱۹۴۷ شروع شدند و در ۱۴ اکتبر آقای چارلز ایگر[1]، خلبان برای نخستین بار با سرعتی بیشتر از صوت پرواز کرد. در سال ۱۹۴۹ بسرعت ۱۵۶۱ کیلومتر در ساعت دست یافتند. انواع تکمیل شده این وسیله ساخته شدند. در سال ۱۹۵۳ هواپیمای Bell-X-IA با سرعتی برابر ۲۶۳۰ کیلومتر در ساعت پرواز کرد.

موتور جدید کورتیس ـ رایت[2] این بار با نیروی رانشی تنظیم‌شوندهٔ ۶۸۰۰ کیلوگرم ساخته شد و روی هواپیما Bell-X-2 نصب و در ۱۹۵۵ با پرواز آزمایش شد. اما در همین سال شرکت North American Aviationساخت هواپیمای موشکی X-15 را شروع کرد. موتور این هواپیما را رآکشن موتورز ساخته بود که با سوخت جامد و نیروی رانشی تنظیم‌شوندهٔ ۲۶۰۰۰ کیلوگرم کار می‌کرد. نخستین پرواز این هواپیما در ۱۹۶۱ بود و در ۱۹۶۲ به سرعتی برابر ۶۶۰۵ کیلومتر (۶ ماخ) در ارتفاع ۱۰۸ کیلومتری دست یافت.

1. Ch. Yeager 2. Curtiss-wright

۴

انرژی هسته‌ای

مراحل نخستین

دگرگونیهایی که در رشته انرژی هسته‌ای، از آغاز به بعد، پدید آمدند سیمایی ویژه دارند.

فهم این پدیدهٔ بنیادی شکستن هستهٔ اورانیم به دوپارهٔ نسبتاً سنگین، به کمک یک نوترون بسیار دشوار است زیرا عادت شده است که واکنشهای هسته‌ای، از آن هسته‌های سبک باشند، چه برای پرتابها و چه برای فراورده‌ها، حتی زمانی‌که آماجها، هسته‌های سنگین هستند. این واکنشها پایه‌ای این‌چنین دارند: (n,n)؛ $(n,2n)$؛ (n,γ)؛ (n,p)؛ (n,α)؛ (p,n)؛ (d,n)؛ (d,p). بدین‌ترتیب سرگردانی مدت چند سال برقرار بود تا اینکه آقایان هان[1] شتراسمان[2] در سال ۱۹۳۸ نظر درست را بیان کردند. این نظر نتایج زیر را دربر داشت:

شکافت هسته‌ای می‌بایست انرژی هنگفتی آزاد کند، زیرا مقدار انرژی اتصال در هسته‌ها در

۱. Hahn اوتو (۱۸۷۹ ـ ۱۹۶۸): شیمیدان آلمانی، در سال ۱۹۴۴ جایزه نوبل را در شیمی برای کارهایش در زمینهٔ شکافت اتمی دریافت کرد. ـ م.

۲. Strassmann فریس (۱۹۰۲ ـ) : شیمیدان آلمانی، که همراه با اوتوهان موفق به دریافت جایزه انریکو فرمی در سال ۱۹۶۶ بخاطر کارهایش در زمینهٔ شکافت اتمی شد. ـ م.

ردیف MeV برای هر ذره است درحالی‌که در اتصالات فیزیکی شیمیایی در ردیف eV می‌باشد؛
و نیز می‌بایست نوترونهایی آزاد شوند، زیرا شمار میانگین نوترونها نسبت به پروتون در هسته‌ها (ثابت یا حتی رادیوآکتیو با عمر کوتاه)، همراه با عدد اتمی افزایش می‌یابد؛
چنانچه این نوترونها فراوان باشند نوعی واکنش زنجیری پدید خواهد آمد که امکان می‌دهد به جهان ماکروسکوپی گذار کند. یعنی با جرم کمی از ماده مقدار هنگفتی انرژی به‌دست آید.
جملگی این نتایج در آزمایشگاههای کوچک، پس از زمان کوتاهی، اساساً و قطعاً، به‌طورکلی تأیید شدند.

نخستین دهۀ عصری نوین: گذار مؤثر به جهان ماکروسکوپی بسیار دشوار بود. حتی از جنبۀ بسیار کلی آن، مستلزم به‌کارگیری دَهها تن مواد جدید نظیر اورانیم فلزی، یا آب سنگینی، یا مواد معمولی نظیر گرافیت، با خلوصی که تا آن زمان سابقه نداشت، بود. آزمایش این کار به بر پا شدن قبلی صنایع پراهمیتی بستگی داشت.

این گذار از آزمایشگاه به‌عمل که از یکسو دورنما و ترس کاربردهای جنگی آن را ترغیب می‌کرد و از سوی دیگر مضیقه‌های جنگ مانع انجام آن بود، در آلمان با شکست مواجه‌شد اما در ممالک متحدۀ امریکا به موفقیت انجامید. کوشش فرانسه، که در همان حالت جنینی با شکست سال ۱۹۴۰ نابود شد در انگلستان ادامه یافت. اما این کشور نیز که نقش بزرگ را به امریکا واگذارده بود، کوشش خود را به همکاری با آن محدود کرد و تنها با کانادا بکارهای تا حدودی درجۀ دوم خشنود شد. نه کشور ژاپن و نه اتحاد جماهیر شوروی سابق، در زمان جنگ در زمینۀ برنامه‌های بزرگ هسته‌ای کار مهمی نکردند با اینکه برخی حقایق روشن مربوط به شکافت هسته‌ای در سال ۱۹۳۹ در شوروی کشف شده بودند.

به سال ۱۹۳۵ بود که انریکو فرمی در رم برای ایجاد واکنش نوترونها با اورانیم به نخستین آزمایش خود دست زد. نتایج پیچیدۀ این کار تنها در پایان سال ۱۹۳۸ بوسیلۀ هان و شتراسمان روشن شدند و نخستین واکنش زنجیری شکافت در ۲ دسامبر ۱۹۴۲ در شیکاگو، از نو به رهبری فرمی تحقق یافت.

اما هنوز با ماشین بدون موتوری سروکار داشتند. برای ایجاد انفجارهای هسته‌ای، ممالک متحدۀ امریکا، لااقل طی سه‌سال کارخانه‌های متعددی ساخت که اکثر جنبه‌های آنها کاملاً تازه بود: رآکتورهای هسته‌ای؛ تأسیسات ویژه آماده‌سازی شیمیایی سوختهای هسته‌ای برای استخراج پلوتونیم از آنها، یک عنصر مصنوعی که تا پایان سال ۱۹۴۰ ناشناخته بود؛ واحدهای جدا

کردن ایزوتوپها بر پایهٔ اورانیم ۲۳۵ (یا آب سنگین). بدون اینکه از همهٔ تأسیسات لازم در مراحل پیش از رآکتور: تهیهٔ مواد اولیه و اجزای متشکله، و مراحل پس از آن: کاربر فراورده‌ها، سخن گفته باشیم.

همهٔ اینها غالباً انگیزهٔ مجموعه‌های واقعی اختراعات و عملی کردن آنها شد، کاری که با وجود شرکت ده‌ها هزار نفر و صدها مؤسسه و کارخانه در آن، پنهانی انجام می‌گرفت و با ویران کردن هیروشیما و بعد، ناگازاکی در ماه اوت ۱۹۴۵ فاش گردید، درحالی‌که هیچ مبادلهٔ علمی و فنی، به‌معنای مصطلح، را پایه‌گذاری نکرد.

این کار، رویهمرفته دو میلیارد دلار هزینه داشت (سی‌سال پس از آن،[۱] این مبلغ، عظمت پیشین را ندارد و ما تورم پیوستهٔ قیمتها را باید به‌حساب آوریم). همکاری دانشمندان با مهندسان هیچ‌گاه این چنین نزدیک، عمیق و درعین‌حال ساده نبوده است. این همکاری در زیر چتر حمایت یک مقام دولتی و سیاسی، در واقع نظامی، انجام می‌گرفت. با چنین پدیده‌ای، اصطلاح «مگا دانش»[۲] زاده شد. انسان با این کار، پدیده‌های واقعاً غول‌آسا را همزمان هم منقاد و هم درهم شکست؛ زیرا، انفجار هسته‌ای، که نمای جالبی هم دارد، اثرات وحشتناکی بر جای می‌گذارد و شدت رادیواکتیویته که همراه با هر واکنش هسته‌ای زنجیری است، با آن همه خطری که دارد، موجود زنده در آغاز، مانند تحت تأثیر اشعهٔ X و یا میکروب قرارگرفتن، خطری احساس نمی‌کند، اما این خطر گسترش می‌یابد درحالی‌که ما با وسایل معمولی مکانیکی یا فیزیکی ـ شیمیایی نمی‌توانیم هیچ کاری روی آن انجام دهیم.

لزوم نوعی دخالت جهانی در این زمینه بزودی احساس شد، گرچه گامهای اولیهٔ آن در سال ۱۹۴۷ با شکست روبه‌رو شده بود.

برای این رشته حوادث شگفت‌انگیز، گذشت کمتر از ده‌سال کافی بود تا دامنهٔ تأثیر آشکار آن بر دانش، صنعت، بهداشت مردم و سیاست، سخن گفتن از آغاز دوران انرژی هسته‌ای را توجیه کنند.

انرژی صنعتی محرمانه: با این‌همه، نوید عمدهٔ انرژی هسته‌ای، همانا نوعی انرژی صنعتی تقریباً پایان‌ناپذیر است که هنوز به‌کار گرفته نشده است. گرمای رآکتورهای ایجادکنندهٔ پلوتونیم به رودخانه‌ها داده می‌شد و می‌بایستی با شتاب تعدادی نیروگاه الکتریکی ساخته می‌شد تا کارخانهٔ غنی کردن اورانیم ۲۳۵ را برق بدهند.

نخستین کاربرد انرژی هسته‌ای مربوط به سوختهای قراردادی ناوهای امریکاست. این سوختها که تحقیق دربارهٔ آنها از سال ۱۹۴۸ آغاز شد در سال ۱۹۵۴ درکشتیهای با سوخت هسته‌ای

۱. زمان نگارش این شرح. ـ م.

2. meǵascience

(زیر دریاییها، سپس زرهدارها، کشتیهای نوع فرقت و نیز ناوهای هواپیمابر) به‌کارگرفته شد. اتحاد جماهیر شوروی در سال ۱۹۶۰ (که کاربرد آن را لااقل در یک یخ‌شکن علنی کرده بود) پس از امریکا به این صف پیوست؛ انگلستان در سال ۱۹۶۳ و فرانسه ۱۹۶۹. اما این کشورها تنها در زیردریاییها آن را به‌کار گرفتند. رآکتورها از نوترون گرمایی استفاده می‌کردند. آنها اورانیم غنی شده (از ۵ تا حدود ۹۰٪ برحسب مورد)، آب تحت فشار را، هم برای کند کردن نوترونها و هم انتقال گرمای برخاسته از شکافت سوخت هسته‌ای به دیگهای بخار، که توربینها را تغذیه می‌کنند به‌کار گرفتند.

برتری انرژی هسته‌ای در این زمینه آشکار است: خودگردانی طویل؛ زیرا تنها یک منبع انرژی برای کار یک سال این ماشین کافی است، و نیز اینکه مدت زیادی ـ تا چند ماه ـ می‌تواند در زیر آب بماند. بهای زیاد این ماشین و نیز سوخت آنها در برابر این امتیازات، مهم نیست. چنین وضعی، این واقعیت را توجیه می‌کند که با وجود ساختن سه یا چهار ناو اتمی آزمایشی، کشتیهای بازرگانی اتمی هنوز ساخته و حتی مطرح هم نشده‌اند.

این برنامهٔ دریایی جالب (رویهمرفته حدود ۲۰۰ کشتی در سال ۱۹۷۵، فقط ده فروند آنها امریکایی و روسی نیستند) نمی‌تواند در پیشرفت رآکتورهای صنعتی، حتی به‌طور قاطع، حتی در ممالک متحدهٔ امریکا تأثیر نداشته باشد.

همهٔ این دستاوردها پس از جنگ در خفای تقریباً مطلق انجام گرفته بود و شکست مذاکرات مربوط به کنترل جهانی، این مخفی کاری را شدت داد.

ممالک متحدهٔ امریکا و اتحاد جماهیر شوروی که کارخانه‌های جداکنندهٔ ایزوتوپهای اورانیم دارند، پژوهشهای صنعتی خود را به ساختن رآکتورهایی متمرکز کرده‌اند. که با اورانیم غنی شده تغذیه می‌شوند. کشورهای دیگر (فقط، نخست انگلستان، کانادا و فرانسه) درپی استفاده از اورانیم طبیعی می‌باشند و در این روش برای کند کردن حرکت نوترونها به گرافیت یا آب سنگین نیاز دارند.

همهٔ این کوششها در سالهای ۱۹۵۵ ـ ۱۹۶۵ به ساخت ماشینهایی انجامید که از جنبهٔ فنی رضایت بخش بودند اما ارزش اقتصادی آنها، به‌علت مقدار کار تعداد کم واحدهای نمایشی یا پیش‌نمونه‌هایی که بیش از چند سال کار نمی‌کنند مورد تردید بود.

بدین‌ترتیب، مسابقهٔ نفس‌گیری آغاز شد که بعدها آن را «جنگ روشها» نامیدند. در همین اوان اتحاد جماهیر شوروی و بعد انگلستان توانستند به سلاح اتمی دست یابند (۱۹۴۹ و ۱۹۵۱). انحصار اتمی و نیز رفته‌رفته مخفی کاری از میان رفت به‌طوری‌که در پایان سال ۱۹۵۳ بر پایهٔ

پیشنهاد آیزنهاور «اتم برای صلح» پدید آمد که میدان را برای خریدوفروش بین‌المللی رآکتورهای هسته‌ای و اورانیم کمی غنی شدهٔ لازم برای تعدادی از آنها باز کرد.

نخستین «کنفرانس جهانی برای کاربرد صلحجویانهٔ انرژی اتمی» که سازمان ملل در اوت ۱۹۵۵ آن را در ژنو تشکیل داد بدین «تشنج‌زدایی» جهانی اتمی روشنایی خاصی بخشید و با ایجاد جنبهٔ اقتصادی و صنعتی بدین انرژی اولیهٔ نوین، انگیزه امیدهای پیش از موقعی شد. کنفرانسهای ژنو بعدی در سالهای ۱۹۵۸، ۱۹۶۴ و ۱۹۷۱ اهمیت فنی و تاریخی کمتری دارند.

نیروگاههای آمادهٔ کار: به زحمت یک سال گذشته بود که «بحران سوئز» (اکتبر ۱۹۵۶) پیش آمد و این بحران نااستواری سیاست ذخیره‌سازی نفت را ثابت کرد و براهمیت انرژی هسته‌ای انگشت گذارد. این هشدار بدون شک ایجاد کمون اروپایی انرژی اتمی (اوراتم)[1] را که می‌بایست طبق مفاد آن (۱۹۵۷) «... با تشکیل و رشد سریع صنایع هسته‌ای، به بالا بردن سطح زندگی در کشورهای عضو خدمت کند ...» سرعت بخشید.

این هشدار، دوامی نیافت و بازگشت سریع فراوانی نفت، پیشرفت این سیاست آینده‌نگر و منطقی، یعنی بررسی تکامل پیش‌نمونه‌هایی را مانع شد که در صورت تحقق بدون تردید بهترین «پاسخ هسته‌ای» به بحران نفتی دومی بود که شانزده سال پس از آن جهان را به لرزه درآورد.

بدون چنین هدفی، صنعت نوزاد هسته‌ای با آشفتگی به پیش رفت. این صنعت که در بازار تنگ و اساساً وابسته به پژوهشهایش فشرده می‌شد، تنها در سال ۱۹۶۵ بود که توانست راه خود را به بازار باز کند، سالی که دو تولیدکنندهٔ بزرگ امریکا (جنرال‌الکتریک، و پس از آن، وستینگهاوس) آمادگی خود را برای فروش نیروگاههای هسته‌ای «آمادهٔ کار» با قیمت نیروگاههای متعارفی اعلام داشتند. دروازهٔ بازار که بدین‌ترتیب با زور باز شده بود کارخانه‌های مذکور، با ترغیب مشتریان خود به خرید آنها، خطر قابل توجهی را پذیرا شدند.

گرچه اطلاع دقیقی در دست نیست، می‌توان حدس زد که ابتکار این سازندگان رآکتور در سال ۱۹۶۵ ارزش یک میلیارد دلار را داشت. شرکتهای تولیدکننده و توزیع برق می‌بایست هزینهٔ مشابهی را برعهده گیرند که عمدتاً مربوط به زمانگیری فزون بر پیش‌بینی ساخت نیروگاههای هسته‌ای و نیز سرویسهای منظم آن می‌شد. بدین جهت لزوم ساخت نیروگاههای متعارفی یدکی و به تأخیر انداختن خارج کردن نیروگاههای فرسوده از رده، برای برای پاسخ دادن به تقاضاها و نگهداری حداقل قدرت موجود احساس می‌شد. تردیدی نیست که در کشورهای صنعتی بزرگ دیگر نیز به تناسب قدرت آنها، اوضاع مشابهی وجود داشته است.

---

۱. Euratom از ترکیب Euroqe و Atom

بهای نیروگاههای هسته‌ای و سوخت آنها با آهستگی بسیار بخصوص در اثر جنگ اکتبر سال ۱۹۷۳ در بازار بسیار بالا رفت؛ با این‌حال، بالا رفتن بهای نفت سبب شد که برق اتمی آشکارا بسیار ارزانتر از برق نیروگاههای کلاسیک باشد.

در جهان غرب، برق هسته‌ای رویهمرفته ۵ تا ۱۰٪ تولید کل را تشکیل می‌دهد. برنامه‌ها پیش‌بینی می‌کنند که این درصد در سال ۱۹۸۵ به ۲۵٪ و در پایان این سده به ۵۰٪ برسد. جامعیت تقریبی این فراورده، به تأسیساتی وابسته است و خواهدبود که اورانیم غنی شده را، اساساً در رآکتورهایی که با آب معمولی (تحت فشار یا جوشان) کُند و خنک می‌شوند، به‌کار می‌گیرند. انواع دیگر رآکتورها، در زمان حال، تنها بخش کوچکی از بازار را در دست دارند و از هم اکنون در شرف زوال هستند (شکل ۱۰۵).

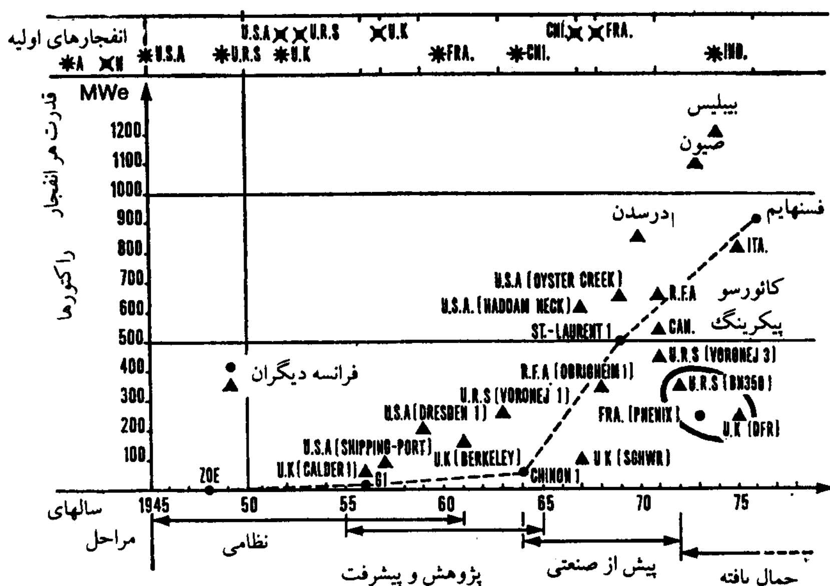
زمینهٔ اجتماعی ـ اقتصادی: همهٔ این تحولات با مشکلات جدی ساخت صنعتی، نظیر ایجاد و غالباً ناپدید شدن سازمانها (عمومی یا خصوصی) همراه بودند که بعضی از آنها قبل از موقع به‌وجود آمده بودند تا برنامه‌هایی که در زیر فشار اقتصادی، ناگزیر شده بودند اجرا کنند.

بستگیهای ویژهٔ انرژی هسته‌ای به برخی مشکلات سیاسی و اجتماعی، که ما دربارهٔ آن سخن خواهیم گفت، نیز روی ساختار تنگناها، که بعدها شدت گرفتند سنگینی می‌کنند. همهٔ اینها سبب می‌شود که موضوع مورد بحث این صفحات، که ویژهٔ تحول یک رشته از فنون است گسترده‌تر گردد. اما چنانچه از زمینهٔ اقتصادی، اجتماعی و سیاسی آن ذکری به‌میان نیاید برخورد درستی با این تحولات نشده است. پیش از هرچیز باید گفت که قبل از اینکه این واقعیت فنی ـ اقتصادی تقریباً تحقق یابد، انرژی هسته‌ای در بازار و صنعت انرژی عمیقاً راه یافته بود.

از یکسوی، دورنمای یک منبع تازه، قابل توجه ـ که نسبتاً بخوبی توزیع شده بود ـ از انرژی اولیه، با کاربرد گستردهٔ سوختهای فسیلی و حفظ رشد آن، که از سدهٔ نوزدهم آغاز شده است در مصرف انرژی، شریک بوده است.

از سوی دیگر، این واقعیت که هرقدر اندازهٔ نیروگاهها، چه برای ماشینهای هسته‌ای و چه برای، ماشینهای معمولی افزایش یابد قیمت آنها کاهش بسیار دارد منجر به گرایش سریع به‌سوی واحدهای با قدرتهای بسیار زیاد شد: در ۲۵ سال پیش یک گروه ۱۵۰MWé را، قوی توصیف می‌کردند اما اکنون دیگ بخار با سوخت اتمی دارای قدرت ۹۰۰MWé معمولی است و طرحهایی برای ساختن ۱۳۰۰ MWé در دست است.

بعدها تشعشعات شدید صنعت هسته‌ای، مشکلات ویژه‌ای برای بهداشت عمومی و نگهداری



شکل ۱۰۵.نمایهٔ کلی و سادّه شدهٔ تحولات انرژی هسته‌ای از ۱۹۴۵.
در نوار بالا، تاریخهای انفجارهای اولیهٔ شکافتی (A) و گداختی (H) آورده شده‌اند.
در نوار میانی، تغییرات توان واحد رآکتورهای اصلی آمده‌اند؛ این تغییرات، مرحله‌ای از پیشرفت یک ملت یا یک نوع ماشین را نشان می‌دهند. پیش‌نمونهٔ رآکتورهای بارآور، با خطوط پهن و بیضی شکل احاطه شده‌اند.
در نوار پایین، مراحل پیاپی گسترش، تقسیم‌بندی مورد گفت‌وگو: ادامهٔ مرحلهٔ نظامی تا کنون؛ آغاز مرحله پژوهش از سال ۱۹۴۵؛ جروبحث دربارهٔ کمال یافتگی کنونی.

از آن ـ چه در کار معمولی رآکتورها و چه به‌هنگام پیشامدهای کوچک و اتفاقی در آنها، مطرح ساخت. در نتیجه در همهٔ مراحل، سیلی از مسایل فنی و مقرراتی بسیار عظیمتر از مسائل و مقررات مربوط به صنایع معمولی سرازیر شد؛ بخصوص، کنترلهای کیفی، در همهٔ مراحل تولید ماشینها و به‌کاراندازی آنها، نه‌تنها بسیار اکید هستند بلکه باید آنها را علامت‌گذاری و طبقه‌بندی کرد تا پیشنیهٔ کاملی از هر قطعه در هر لحظه در دسترس باشد. بنابراین، صنعت هسته‌ای را تنها می‌توان با صنعت فضانوردی مقایسه کرد.

دشواریهای ویژه: تولید انرژی هسته‌ای، لزوماً همراه با فرایندهایی است که در مراحل پیش و پس از نیروگاهها و نیز در خود قسمت هسته‌ای، در رآکتورها، وجود دارند.

نیازی به گفتن ندارد که اساساً، انرژی متعارفی هم، متضمن چنین فرایندهایی، اما در زمینه‌های دیگر است. لوازم انرژی متعارفی، در واقع تقریباً تنها در مراحل پیش از نیروگاه است: معدنهای زغال‌سنگ، چاههای نفت و پالایشگاهها، نقل و انتقال و ذخیرهٔ سوخت. چون این ماده عملاً کاملاً در کورهٔ نیروگاه مصرف می‌شود چیزی در مراحل بعدی نمی‌ماند. همچنین آخالها (خاکستر، گردوغبار، گازهای زیانبخش، گرمای تلف شده) مشکلاتی پدید می‌آورند که اهمیت آنها به نسبتی که مصرف انرژی افزایش می‌یابد. بیشتر می‌شود و نیز تودهٔ مردم نگران سلامت عمومی و تأثیر زیانبخش صنعت بر محیط زیست می‌شوند.

دربارهٔ انرژی هسته‌ای، برعکس، این مراحل پس رآکتور است که مراحل پیش از رآکتور را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. در مراحل پیش از رآکتور، ما معدنهای اورانیم (و توریم) را کشف می‌کنیم و کانه‌ها را به فراورده‌های آماده تبدیل می‌کنیم، مثلاً عناصر سوختی را در رآکتورها وارد می‌کنیم. تعدادی کارخانه‌های شیمیایی و متالورژی، غالباً بسیار معمولی، گاهی هم بسیار مجهز (مثلاً کارخانه‌های جداسازی ایزوتوپها) در این کار سهیم‌اند. چون محتوای انرژی پتانسیل سوختهای هسته‌ای حدود یک میلیون بار بیش از انرژی پتانسیل سوختهای معمولی است. جرمهای کلی مورد عمل نسبتاً کم می‌باشد، حتی اگر کانهٔ مورد عمل هزار بار فقیرتر باشد؛ گرچه در نیروگاههای هسته‌ای، بخشی از سوختها (چندصدم) مصرف می‌شود.

درعین‌حال، سوختهای تازه و نیز آخالها (فراورده‌های شکافت هسته‌ای) یی در همانجا تشکیل می‌شوند که رادیواکتیویته، مانع ریختن آنها در اطراف است؛ شرایطی و انبارکردن همراه با مراقبت را تحمیل می‌کنند. این قسمت پس از رآکتور موظف است که سوخت مصرف نشده (قدیم و جدید) را بازیابی کند و آخال را از آن جداسازد. این کار هم در اصل در ردیف صنایع شیمیایی است و از نظر مقدار مورد مصرف، کار سبکی است اما چون همراه تشعشعات زیان‌بخشی است که باید دست‌کاری شوند کاری کاملاً تازه است، آثار این تابشها هم در خود فرایندهای دست‌کاری و هم در مقررات مربوط به مسائل بهداشتی کار و سلامت مردم انعکاس دارد.

این مشکلات که قبلاً در خود نیروگاههای معمولی وجود داشتند دربرابر مسائل پیش از رآکتور، نسبتاً بسیارکم اهمیت می‌باشند.

پس از این مقدمه، که به‌علت طبیعت ناگفته و ویژگیهای بسیار خاص انرژی هسته‌ای، لازم به‌نظر آمد، اینک ما می‌توانیم تاریخ این تکنیک را خلاصه کنیم: نخست، تاریخ نیروگاهها، سپس تاریخ مسائل فرعی در مراحل پیش و پس از رآکتور.

نیروگاههای هسته‌ای

اصول شکافت زنجیری: برای اینکه واکنشی به‌شکل زنجیری پیش برود می‌بایست جرمی کافی از مادهٔ شکاف‌پذیر، به‌اصطلاح جرم بحرانی، انباشته شود. در واقع، بسامد شکافتها در واحد زمان، بنابراین شمار نوترونهایی که از آن نتیجه می‌شوند متناسب این جرم هستند، یعنی به عامل شکل، تقریباً به‌شکل مکعب یک بُعد مشخصه تناسب دارند. شمار نوترونهایی که در همان زمان از جرم مورد بحث خارج و برای واکنش زنجیری از دست می‌روند نیز متناسب با مساحت رویهٔ بیرونی همین جرم است بنابراین، همیشه با عامل شکل، تقریباً مجذور یک بعد مشخصه تناسب دارند. در حقیقت ما هیچ واکنش خود پایداری نخواهیم داشت مگر اینکه شمار نوترونهای تولید شده بر نوترونهای فراری فزونی یابند. بنابراین رابطهٔ (سطح به حجم) باید از یک مقدار معین کمتر باشد. وانگهی، شمار نوترونها در هر شکافت، که به نوع هسته شکافت‌پذیر (و کمی هم به انرژی نوترون) بستگی دارد برحسب مورد از۲٫۳ تا ۳٫۵ تغییر می‌کند. اما بخشی از آنها هم، چنانچه از رویه فرار نکرده باشند بوسیلهٔ اجزای دیگر سیستم گرفتار می‌شوند.

چنانچه پس از هر شکافت، یک نوترون موجود باشد واکنش زنجیری برای ایجاد یک شکافت تازه با سرعت ثابتی پیش می‌رود.

احتمال شکافت یک هستهٔ معین شکافتپذیر بنوبهٔ خود بستگی به انرژی نوترونی دارد که به آن برخورد می‌کند. برای مهمترین هسته‌های شکافت‌پذیر (اورانیم ۲۳۵ و پلوتونیم ۲۳۹)، زمانی‌که انرژی نوترون پایین می‌آید این احتمال افزایش می‌یابد. بدین‌ترتیب، نوترونهای شکافتی مقدار زیادی انرژی جنبشی دارند. بنابراین، برای «کند کردن» این انرژی باید از مواد به‌اصطلاح «کندساز» استفاده شود. این مواد هسته‌های سبکی دارند که در اثر برخورد نوترونها با آنها، انرژی اولیه نوترونها مصرف می‌شوند و بدون اینکه غالباً گیر بیفتند کند می‌شوند. با این‌همهٔ می‌توان سیستمهای (به‌اصطلاح «با نوترونهای سریع») را که عاری از کندساز هستند، هم به‌کار گرفت.

وانگهی می‌بایست گرمای برخاسته از شکافت را برای استفاده از آن مثلاً در توربینها بیرون برد و برای این کار از یک مادهٔ گرمابر استفاده می‌شود

بنابراین، معلوم می‌شود که اندازهٔ بحرانی نه‌تنها به نوع هسته‌های شکافت‌پذیر بستگی دارد بلکه به مواد دیگر به‌کار رفته، نسبت و ترتیب هندسی آنها نیز مربوط می‌شود.

غالباً بهتر است که مادهٔ شکافت‌پذیر را به‌طور نسبتاً فشرده به‌کارگرفت و به‌طور فیزیکی از مادهٔ کندساز و نیز مادهٔ گرمابر جدا نگه‌داشت. دراین‌صورت، از «رآکتورهای ناهمگون» سخن می‌رود

و حال‌آنکه در «رآکتورهای همگون» مادهٔ شکاف‌پذیر، در کندساز محلول یا به‌طور ظریفی در آن پخش شده است.

مواد گرمابر و کندکننده ممکن است یکی باشند یا نباشند. انتخاب این یا آن، دلایل اقتصادی و هسته‌ای دارد. تنها مواد کندکنندهٔ مورد استفاده عبارتند از: کربن به‌شکل گرافیت صنعتی، هیدروژن به‌شکل آب یا بعضی از هیدروکربنها، عنصر دوتریم به‌شکل آب سنگین، عنصر بریلیم در شکل فلزی یا اکسید آن. تنها مواد گرمابر مورد استفاده عبارتند از: آب، آب سنگین، گاز کربنیک، عنصر هلیم، سدیم مذاب. کوشش شده است که مادهٔ گرمابر مخلوطی از نمک مذاب فلوئورید سوخت مایع به‌شکل اورانیم تترافلوئورور باشد. این کوشش به موفقیت انجامیده، اما کاربرد صنعتی نیافته است.

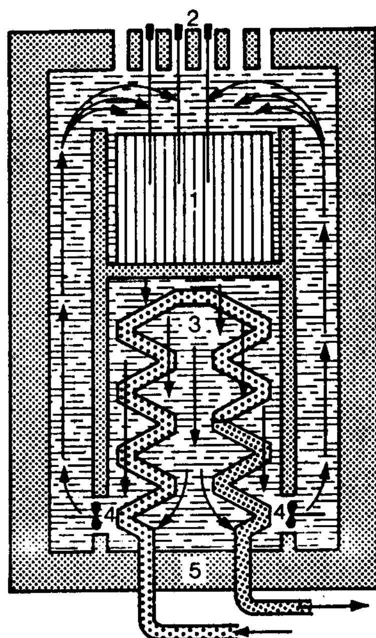
سرانجام، سوخت می‌تواند اورانیم ۲۳۵ کم‌وبیش غنی شده، پلوتونیم ۲۳۹، اورانیم ۲۳۳ باشد (تنها اورانیم ۲۳۵ در طبیعت وجود دارد، دو سوخت دیگر از فراورده‌های صنعت هسته‌ای می‌باشند). به‌طورکلی، این سوخت با هسته‌های بارآور مخلوط یا مقابل هم گذاشته می‌شود تا در اثر گیراندازی نوترون و رادیواکتیویتهٔ حاصله، هسته‌های شکافتپذیر زیر تهیه شوند:



$$U238 \longrightarrow Pu239 \qquad Th232 \longrightarrow U233$$

انواع رآکتورها: هر ترکیب (شکافت‌پذیر+ بارآور + کندساز + گرمابر) در اصل مرتبط به مواد ساختمانی مخصوص، ویژهٔ خانواده‌ای از رآکتورهاست (که از ۲۰۰ نوع افزون‌اند)، که هرکدام شامل مدلهای مختلفی (جدول ۱) هستند. حتی چنانچه خود را در چارچوب ارزانترین و ساده‌ترین رآکتورها محدود کنیم، با انواع زیادی رآکتور روبه‌رو می‌شویم که جدول II نمایی از آنها می‌دهد، درحالی‌که رآکتورهایی را بخاطر بررسیهای فیزیکی یا پژوهشهای روی مواد ساخته شده‌اند به‌حساب نیاورده‌ایم، که ۱۷ ترکیب هستند که ۱۵ ترکیب آنها لااقل تا ساختار رآکتور آزمایشی یا پیش‌نمونه پیش رفته‌اند. دو نوع دیگر، رآکتورهای سریعی که با هلیم یا بخار آب خنک می‌شوند موضوع بررسیهای پیگیر هستند. از میان نوع نخست، ۹ مدل (A تا I) دارای پیشرفت صنعتی بودند. سه‌تای از آنها (A، B، E) (شکل ۱۰۶) اکنون کنار گذاشته شده‌اند (یعنی از سالهای ۱۹۶۵ ـ ۱۹۷۰ از این رآکتورها دیگر ساخته نشده است، گرچه از آنهایی که مانده‌اند استفاده می‌شود و آنهایی را که تمام نشده بودند تمام کرده‌اند)، حال‌آنکه رآکتورهای دیگر که هنوز گویا ساخته نشده‌اند ممکن است آینده‌ای داشته باشند (رآکتورهای سریعی که با هلیم خنک می‌شوند، رآکتورهای D_2O و گرمابر آلی رآکتوری با آب تحت فشار با چرخهٔ ThU ـ ۲۳۳ و رآکتور با نمکهای مذاب).

درحال‌حاضر رآکتورهای ساخته یا سفارش داده شده اکثراً از نوع F و G هستند (رجوع



شکل ۱۰۶.رآکتور گرافیت ـ گاز با اورانیم طبیعی یا کمی غنی شده (AGR).
همان‌طورکه در نمایه‌های بعدی رآکتورها نشان داده می‌شوند، حفاظ بیرونی، روکشی است که همهٔ نیروگاههای هسته‌ای آن را دارند. گروه توربو ـ آلترناتور نشان داده نشده است.۱. دل رآکتور؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. تعویض‌کنندهٔ بخار؛ ۴. بادبزن جریان‌دهنده گازها؛ حفاظ از بتون پیش تنیده.

جدول ۱

هسته‌های شکافت‌پذیر	U۲۳۵	Pu۲۳۹	U۲۳۳			
هسته‌های بارآور	U۲۳۸	Th۲۳۲				
کندسازها	H_2O C	D_2O	C_xH_y	Be	BeO	
گرمابرها	H_2O	C_xH_y	D_2O	CO_2	He Na	(MF_x)

جدول ۲

هستهٔ شکافت‌پذیر / هستهٔ بارآور	مخلوط طبیعی ۱ { U۲۳۵ U۲۳۸					مخلوطی که با U۲۳۵ کمی غنی شده است ۱ { U۲۳۵ U۲۳۸					۲۳۳ یا U۲۳۵ ۳ و ۲ و ۱ U۲۳۸ یا Th۲۳۲				U۲۳۳ یا Pu۲۳۹ ۴ و ۳ و ۲ U۲۳۸ یا Th۲۳۲		
سوخت	U فلزی		UC	UO_2		UO_2					UO_2SO_4 یا UO_2 ۵	UO_2 یا UC ۶		UF_4 ۷	$(U,Pu)O_2$ $(U,Pu)C$ ۸		
کندکننده	C ۱۰	C	D_2O ۱۰	D_2O ۱۰		D_2O ۱۰	C		H_2O		H_2O یا D_2O	C		C		۹	
گرمابر	H_2O	CO_2	C_xH_y ۱۱	CO_2	D_2O	H_2O	CO_2	H_2O	H_2O تحت فشار	H_2O جوشان		He	Na	LiF ۷	Na	He	H_2O
نوع صنعتی	A ۱۲	B ۱۳			C ۱۴	D ۱۵	E ۱۶	A' ۱۲	F ۱۷	G ۱۸		H ۱۹			۱ ۲۰		
توان مصرفی (در ۱۰۰۰ MWé) در آغاز سال ۷۶ ۲۱ — نصب شده		۸/۵		۰/۱۸	۳	۰/۳۵	۰/۳۳	۳	۳۴	۲۳		۰/۷			۰/۶۷		
در حال ساخت سفارش داده شده					۸	۴	۶	۹	۲۰۷	۸۴		۷			۲		

۱. بخشی از Pu تشکیل شده در این راکتورها در همان‌جا مصرف می‌شود. همچنین می‌توان Pu را به دل‌خواه، بتمامی یا به‌طور جزئی با U۲۳۵ تعویض کرد. مخلوط طبیعی دارای ۰/۷۱٪ از U۲۳۵ و مخلوطهای کمی غنی ۴ یا ۵٪ از U۲۳۵ دارند.

۲. کاربرد U۲۳۵ امکانی است که تنها در مهلت زیاد عملی است، زیرا نخست باید ذخیره‌ای از این فراوردهٔ مصنوعی تهیه می‌شود.

۳. در این موارد، هسته‌های شکافت‌پذیر، در صد بزرگی (۱۰ تا ۵۰٪ وگاهی هم بیشتر) را تشکیل می‌دهند.

۴. همچنین می‌توان از U۲۳۵ استفاده کرد، اما گویا این کار بصرفه نیست.

۵. محلول UO_2SO_4 یا پخش UO_2 به‌شکل دانه‌های بسیار ظریف. راکتورهای به‌اصطلاح همگن مورد نظر است که پیش از مرحلهٔ پیش‌نمونه، در دههٔ ۶۰ کنار گذاشته شدند.

۶. UC_2 نیز امکان‌پذیر است، سوخت در زمینه‌ای از گرافیت پخش شده است.

۷. فلوئوروها UF_4 و LiF در حالت مذاب به‌کار می‌روند، اما فلوئورهای دیگری نیز بدان می‌افزایند تا نقطهٔ ذوب پایین آید (تنها یک رآکتور نمایشی در امریکا چنین عمل می‌کند).

۸. کاربرد نیترورها یا سیلیسیورها هم مورد نظر هستند، اما عملی نشده‌اند.

۹. منظور رآکتورهای بانوترون سریع هستند که از واکنش هسته‌های بارآور، با هسته‌های شکافت‌پذیر که آنها را مصرف نمی‌کنند، تولید می‌شوند. «رآکتورهای بارآور» از این لحاظ نامیده شده‌اند.

۱۰. کندکننده، خنک می‌ماند (۸۰ °C).

۱۱. مخلوطهای ترفنیلها یا مشتقات آنها منظور هستند. تنها یک رآکتور از این هیدروکربنها هم‌زمان به‌عنوان کندساز و گرمابر استفاده می‌کند. دراین‌صورت سوخت غنی‌شده ضرور است.

۱۲. این رآکتورها، هرگاه با اورانیم طبیعی تغذیه شوند صرفاً برای به‌دست آوردن پلوتونیم به‌کار می‌روند و از تولید الکتریسیته ناتوان‌اند؛ زیرا در دماهای بالا کار نمی‌کنند. اما زمانی‌که از اورانیم غنی شده استفاده کنند این توان را دارند. در چنین حالتی آنها از خانوادهٔ A' هستند که تنها در اتحاد جماهیر شوروی [سابق] ساخته می‌شوند.

۱۳. روش اورانیم طبیعی ـ گاز ـ گرافیت که در سالهای ۱۹۶۰ ـ ۱۹۶۵ در فرانسه و انگلستان به‌کار گرفته می‌شد، اکنون کنار گذاشته شده است.

۱۴. نوع کانادایی Candu که کوتاه شدهٔ CANadian Deuterium oxide Uranium است که چند واحد از این نوع به کشورهای درحال‌توسعه فروخته شده‌اند.

۱۵. مدلی که پس از سال ۱۹۷۴ در انگلستان پذیرفته شد.

۱۶. از مدل AGR، کوتاه شدهٔ Advanced Graphite Reactor در حدود سال ۱۹۶۰ استقبال شد اما پس از ۱۹۷۰ کنار گذاشته شد. این مدل احتمالاً می‌توانست به موفقیتهایی بیانجامد.

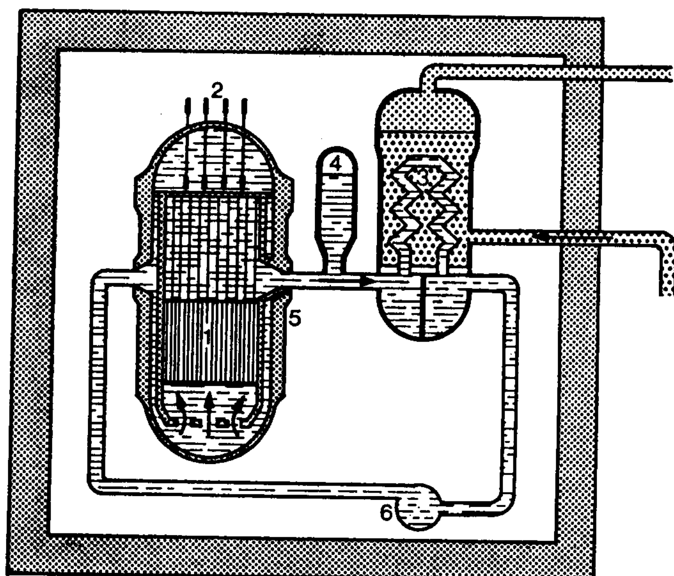
۱۷. مدل PWR، کوتاه شدهٔ Pressurized Water Reactor، مستقیماً از نوع رآکتورهای کشتی اقتباس شده است، گر چه تفاوت زیادی از نظر بها و طرز کار با آنها دارد. بازار این نوع رآکتور، مستقیم یا غیرمستقیم، در دست وستینگهاوس است. تعدادی از این نوع رآکتور در ممالک متحدهٔ امریکا و کشورهای دیگر، بویژه در اروپای غربی (به استثنای بریتانیای کبیر) فعال یا در مرحلهٔ ساخت می‌باشند. این تنها مدل رآکتور بانوترون کند برنامهٔ هسته‌ای فرانسه از سال ۱۹۷۴ به بعد است.

۱۸. مدل BWR، کوتاه شده Boiling Water Reactor، ساخت مستقیم یا غیر مستقیم جنرال الکتریک است. این مدل در ممالک متحدهٔ امریکا و دیگر کشورها فعال است، گر چه رواج آن به اندازهٔ PWR نیست.

۱۹. این رآکتورها برای رسیدن به دماهای بسیار بالاتر از رآکتورهای پیشین، ساخته می‌شوند ۸۰۰ °C یا بیشتر، دربرابر ۳۵۰ °C، و بدین‌ترتیب، می‌توانند توربوآلترناتورهای بسیار جدید، حتی احتمالاً توربینهای گازی را تغذیه کنند و گرمای مورد نیاز تعدادی صنایع شیمیایی را تأمین سازند. این رآکتورها با دشواری زیاد به بازار راه یافتند.

۲۰. رآکتورهای بارآور با نوترونهای سریع می‌توانند توربو آلترناتورها را با بخار داغ ۵۵۰ °C تغذیه کنند. از نظر اقتصادی و صنعتی گرچه قابل قبولند اما آیندهٔ دور به آنها خوش آمد می‌گوید. تنها چند دستگاه نمایشی و دو پیش‌نمونه از آنها فعال می‌باشند.

۲۱. ارقام مزبور گرد شده‌اند. می‌توان به یاد آورد که واحدهای فعال تا سال ۱۹۶۰ توانشان ۱۰۰ تا MWe' ۲۰۰ بود و در سال ۱۹۷۵ به ۴۰۰ تا MWe' ۶۰۰ رسید و اکنون MWe' ۹۰۰ یا بیشتر توان دارند.

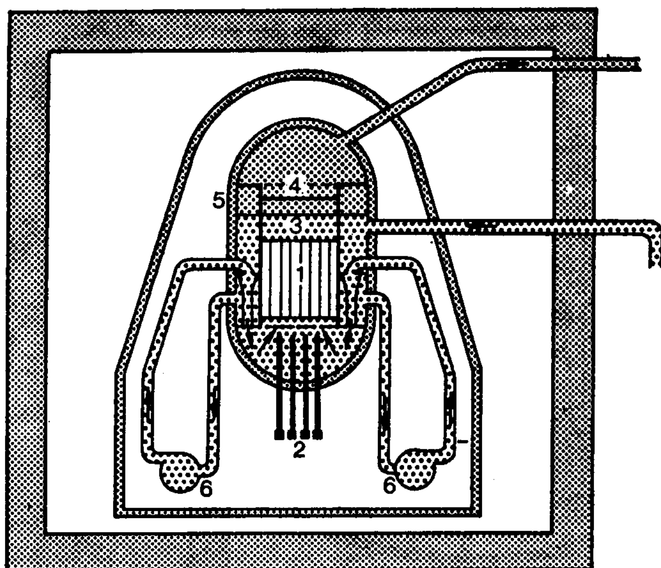


شکل ۱۰۷.رآکتور با آب تحت فشار (PWR).
۱. دل؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. مولد بخار؛ ۴. مخزن فشار آب؛ ۵. ظرف فولادی؛ ۶. تلمبه‌ای که آب را بین دل رآکتور و مولد بخار می‌گرداند.

کنید به‌شکلهای ۱۰۷ و ۱۰۸ و نیز) شباهتهایی با انواع C و D دارند. پایهٔ برنامه‌های مهم الکتروهسته‌ای پایان این سده بر روی آنها گذارده شده است. رآکتورهای گروه H و I رفته‌رفته جا می‌افتند و در سالهای پس از ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ اکثریت خواهند شد (رجوع کنید به شکل ۱۰۹).

این نکته را باید تأکید کرد که طرحهای گوناگون رآکتورها و برگزینی مواد مختلفی که می‌توانند به‌کار گرفته شوند از مدتها پیش (قبل از ۱۹۵۵) طراحی و معیّن شده‌اند. اما برای اینکه طرحها به مرحلهٔ عمل صنعتی، اقتصادی و از نظر فنی قابل اعتماد برسند راه بسیار طولانی و دشواری برای تکمیل و راه‌اندازی در پیش دارند. این کار باید در همهٔ زمینه‌ها از طرح کلی سیستمها تا نقشه‌کشی قطعات و بررسی دقیق مواد انجام گیرد.

ساختمان رآکتور: شکافت زنجیری به‌عنوان یک احتراق شیمیایی سرچشمه‌ای از گرما و انرژی سرکش است. از این‌روی آن را کوره (یا دیگ) هسته‌ای نیز نامیده‌اند و مادهٔ شکافت‌پذیر را که شکل شیمیایی و مکانیکی مناسبی یافته است سوخت هسته‌ای می‌نامند، که عناصری از سوخت مؤثر



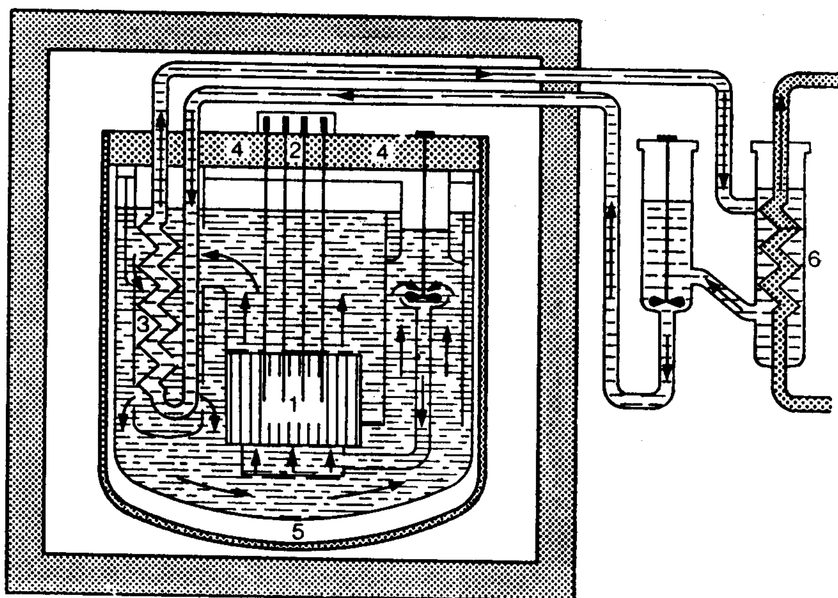
شکل ۱۰۸.رآکتور با آب جوشان (BWR).

۱. دل رآکتور؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. مخلوط آب و بخار؛ ۴. جداکننده و خشک‌کنندهٔ بخار؛ ۵. ظروف فولادی؛ ۶. تلمبه‌های جریان‌دهندهٔ آب اولیه.

در رآکتورها را در خود دارد.

این گرما باید بوسیله‌ای انتقال یابد که جزئی از آن را به انرژی ساماندار و قابل استفاده تبدیل کند. این امر متضمن انتقال گرما از طریق سطوح تبادل آن است. اما گرچه محیط گیرنده (به‌طورکلی آب) در یک رآکتور و یک دیگ بخار کلاسیک تفاوتی با یکدیگر ندارند، فرستنده در یک رآکتور می‌تواند چگالی توان قابل توجهی داشته باشد که باید مهار زده شود تا از محدودهٔ شاره گرمایی که می‌توان آن را منتقل و تخلیه کرد تجاوز نکند. این محدوده برای هر سانتیمترمربع، تقریباً صد وات است . (می‌توان انتظار یک کیلووات در هر سانتیمترمربع را در شرایط خاصی، مثلاً در لامپهای فرستندهٔ رادیو با توان زیاد داشت. اما در رآکتورهای اتمی و دیگهای بخار، میانگین آن از ۲۰ تا ۵۰ وات در سانتیمترمربع است).

در هر رآکتور، بسته به نوع آن، از داخل به خارج قطعات زیر را می‌توان یافت: دل، منطقهٔ دور دل، صندوقچه، حفاظ، دیوارهٔ بتونی. ضمائمی نیز آن را تکمیل می‌کنند.



شکل ۱۰۹.رآکتور با نوترونهای سریع که با سدیم مایع خنک می‌شود.
۱.دل؛ ۲. میله‌های تنظیم؛ ۳. تعویض‌کنندهٔ اولیهٔ سدیم ـ سدیم؛ ۴. ظرف دوتایی تعویض‌کنندهٔ دوم سدیم ـ آب ـ بخار (چرخه سه‌گانه).

دل: دل مجموعه‌ای از عناصر سوختی و ساختاری است که درحالی‌که گردش مایع گرمابر را تأمین می‌کنند عناصر سوختی را نگاه می‌دارند. دل شامل کندساز نیز می‌باشد و این زمانی است که مادهٔ کندساز، همچون مورد پیلهای گرافیتی، جامد باشد و محل مکانیسمهای تنظیمی را نیز سامان می‌دهد. دلها در رآکتورهای گوناگون و حتی در رآکتورهای مختلف از یکنوع با یکدیگر تفاوت زیاد دارند.

چگالی توان میانگین در انواع رآکتورها با یکدیگر متفاوتند (در دل رآکتورهای گرافیتی ـ گازی اورانیم طبیعی حدود چند کیلووات گرمایی در هر لیتر است، اما در رآکتورهای با آب تحت فشار یا جوشان به ۱۰۰ کیلووات گرمایی می‌رسد و در رآکتورهای با نوترونهای سریع ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلووات گرمایی در هر لیتر است) که به‌طورکلی از چگالی دیگهای معمولی کنونی بخار بیشتر است.

منطقهٔ دور دل: گرچه بیشتر نوترونها در دل به‌وجود می‌آیند و نابود می‌شوند، درصد قابل توجهی (که به تناسب رابطهٔ سطح به حجم و نوع هسته، تغییر چشمگیری دارند) از آنها فرار می‌کنند و منطقهٔ دور دل باید آنها را جبران کند. این کار از دو راه عملی است، دو راهی که ناقض یکدیگر نیستند. در رآکتورهای با نوترونهای گرمایی، دل را با یک بازتابنده، معمولاً کندسازی که پس از کند کردن، بیشتر نوترونهای فراری را به‌سوی دل برمی‌گرداند می‌پوشانند. راه دوم، که معمولاً در رآکتورهای بارآور با نوترونهای سریع مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌کار گرفتن یک پرده یا روکشی اساساً از مادهٔ «بارآور» است که نوترونها را طوری جذب می‌کند تا از آنها هسته‌های شکافت‌پذیری از نو بسازد.

ظرف فولادی: دل و بازتابنده (یا پرده) در ظرفی یا صندوقی گذاشته می‌شوند که کاملاً بدون منفذ است و فشار لازم برای نگهداری مادهٔ خنک‌کننده، که ثابت یا در گردش است، را اعمال می‌کند. مثلاً، مقدار فشار در صندوق بزرگترین رآکتورهای گرافیتی ـ گازکربونیکی با اورانیم طبیعی (حجمی در حدود ۶۰۰۰ مترمکعب و توان ۵۰۰MWé) بیست‌وهفت اتمسفر است. ظرفهای رآکتورهای با آب تحت فشار با ۱۰۰۰MWé حجمی در حدود ۱۵۰ مترمکعب و فشاری برابر ۱۵۰ اتمسفر را تحمل می‌کنند (برای رآکتور با آب جوشان، حجم ۳۰۰ مترمکعب و فشار ۷۲ اتمسفر است).

در عوض ظرف رآکتورهای با آب سنگین از نوع کانادایی یا انگلیسی، فشاری بیش از دو اتمسفر تحمل نمی‌کنند زیرا در این دو مدل با استوانه‌هایی برخورد می‌کنیم که محتوی آب سنگین بسیار سرد می‌باشند. لوله‌های تحت فشار از درون آن عبور می‌کنند و مادهٔ خنک‌کنندهٔ درون آنها عناصر سوختی را دور می‌زند و فشار مکانیکی، روی آنهاست، بنابراین ظرف متحمل فشاری نمی‌شود.

همچنین باید گفت که ظرفهای مربوط به رآکتورهای با نوترونهای سریع، که با سدیم مایع خنک می‌شوند، در زیر فشارهای کمی هستند. ساخت این ظرفها و صندوقها، کار پیچیده‌ای است و غالباً آنها را از فولاد می‌سازند.

در مورد رآکتورهای گرافیتی با بزرگی (۱۰ تا ۱۵ متر طول و همین اندازه ارتفاع)، ورقهای فولاد برای ساختن ظرف (که ضخامت آنها به ۹٫۵ سانتیمتر می‌رسد) در جا جوشکاری می‌شوند. بازرسی محل جوش و بویژه تابکاری مجموع، مشکل بسیار بزرگی است.

رآکتورهای با آب تحت فشار، به ظرفهای استوانه‌ای با قطر چهار متر نیاز دارند. ته و سر این استوانه، گنبدی است و ارتفاع آن به ۱۲ متر می‌رسد، درحالی‌که ضخامت ورق ۲۰ سانتیمتر است. درون این استوانه‌ها روکشی از فولاد زنگ‌ناپذیر دارد تا از خورندگی جلوگیرد (کاربرد فولاد

زنگ‌ناپذیر برای همهٔ استوانه، بسیار گران تمام می‌شود). وزن آنها حدود ۳۰۰ تن است.

بالاخره باید گفت که لوله‌های بزرگ باید به این صندوق اتصال داشته باشند، کاری که ساخت آن را دشوارتر می‌کند (شکل ۱۱۰).

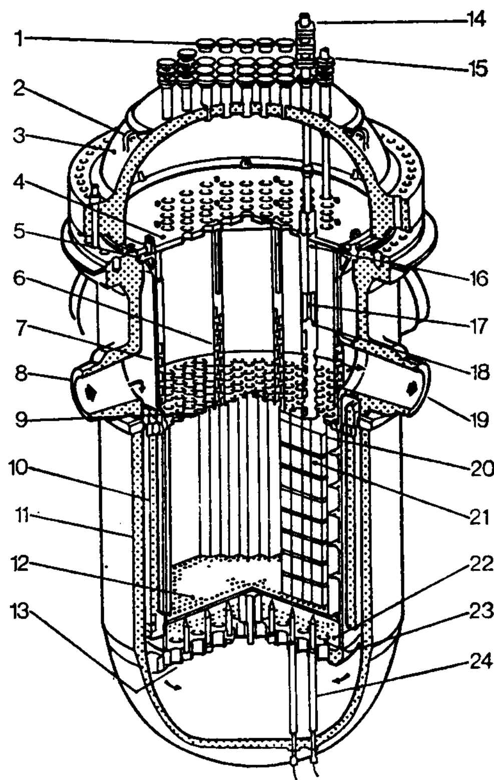
در رآکتورهای BWR، که فشار آب کم و ضخامت ۱۵ سانتیمتر کافی است. برعکس، قطر و ارتفاع آشکارا بزرگتر می‌باشند و وزن از ۵۰۰ تن فراتر می‌رود. ارتفاع باید در حدی (۲۱ متر) باشد تا با قرار دادن وسایلی در آن بتوان بخاری که مستقیماً در توربین به‌کارگرفته شده است بدون هیچ‌گونه قطرات آب باشد (انحناهایی داده می‌شود تا حالت مرکزگریزی پدید آید). با این قطر زیاد (۵/۵ متر) می‌توان افشانه‌هایی درون ظرف، بیرون از خود دل گذاشت که مدار نسبتاً کوچکی از آب تحت فشار آنها را تغذیه می‌کند و آب کافی را درون دل جریان می‌دهند.

در فرانسه در سال ۱۹۵۵ رآکتورهای گرافیتی ـ گازی C_2 و C_3 مارکول[1] صندوقهایی از بتون پیش‌تنیده دریافت داشتند که با یک آستر داخلی نسبتاً نازک از فولادها، آب‌بندی شده بودند. این صندوقها که کاملاً بجا، با نام طاق‌نصرت اتوال شهرت یافتند رضایت‌بخش بودند. این تکنیک که به هدف «مجتمع» لوازم سنگین، تکامل یافته است، در همهٔ رآکتورهایی که با گاز تحت فشار خنک می‌شوند به‌کارگرفته می‌شود. امکان کاربرد آن با رآکتورهای آبی هم آزمایش شده است، اما هنوز از مرحلهٔ مدلهای کوچک آزمایشی فراتر نرفته است.

این لوازم سنگین عبارتند از: مبادله‌گرهای گرما و ماشینهای سوخت‌گردان.

مبادله‌گر گرما: این دستگاه، گرمای مایع گرمابر اولیه را به آبی منتقل می‌کند که تبخیر می‌شود و توربین را می‌گرداند. تاکنون، با موفقیت از بخار اولیهٔ رآکتورهای با آب جوشان برای گردانیدن توربینها استفاده کرده‌اند. این کار مستلزم داشتن اطمینان بسیار زیاد به‌کار غلافهای سوخت است، زیرا نشت بسیارکم هم می‌تواند بخاری که توربین را می‌گرداند، کندانسور و مدارهای وابسته به آن را با رادیواکتیویتهٔ خطرناکی آلوده کند. اما گاهی از کاربرد دستگاه خنک‌کنندهٔ آب، که در بسیاری از رآکتورها ضروری است، صرفه‌جویی می‌شود. این کار بویژه در رآکتورهای PWR (شکل ۱۱۱) (که دستگاههای بخارساز آن، که مهم می‌باشند، حتی از خود ظرف فولادی رآکتور حجیمتر خواهند بود و در ضمن، ساخت و در مواقع ضرور، تعمیر آن نیز دشوار است)، و در رآکتورهای با نوترونهای سریع ـ که یک مدار اولیه از سدیم بسیار رادیوآکتیو، گرما را از دل رآکتور به مدار دیگری از سدیم انتقال می‌دهد که رادیوآکتیو نیست، یعنی مداری که بنوبهٔ خود مدار آب ـ بخار را تغذیه می‌کند ـ عملی شده است.

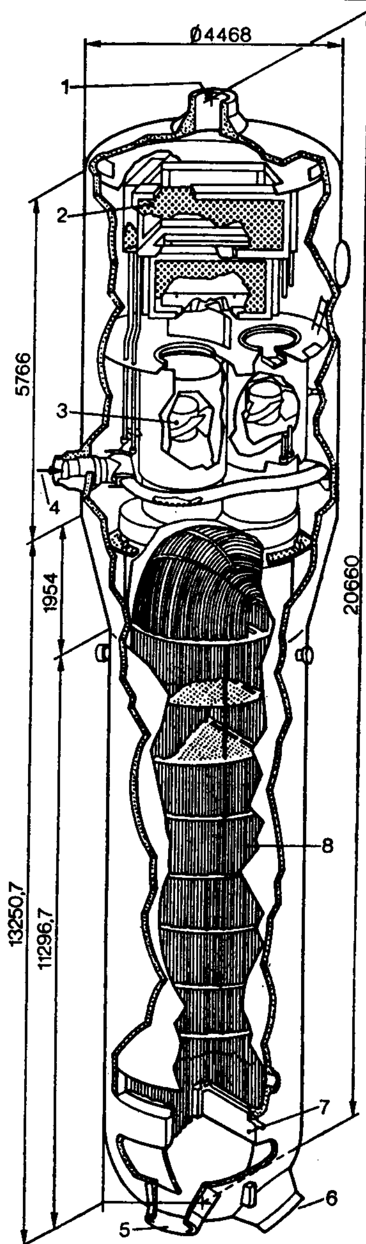
1. Marcoule



شکل ۱۱۰.ظرف و دل یک رآکتور با آب تحت فشار PWR.

روی رآکتوری با توان ۹۰۰ MWé قطر ظرف حدود چهار متر است و صخامت ورق آن ۲۰ سانتیمتر، و ارتفاعش ۱۲ متر.

۱. آداپتور سرهای میله‌های تنظیم؛ ۲. دستگیرهٔ تنظیم؛ ۳. سرپوش؛ ۴. ورق پشت‌بند بالا؛ ۵. قطعات درونی؛ ۶. بستها؛ ۷. لفاف دل؛ ۸. لولهٔ ورود آب اولیه؛ ۹. ورق فولادی بالای دل؛ ۱۰ پردهٔ گرمایی؛ ۱۱. ظرف فولادی؛ ۱۲. ورق پایین دل؛ ۱۳. ته لفاف دل؛ ۱۴. مکانیسم سرهای میله‌های تنظیم؛ ۱۵. گذرگاه آلات و ابزار؛ ۱۶. لولهٔ راهنما؛ ۱۷. میلهٔ راه‌اندازی؛ ۱۸. پیوست سرهای تنظیم؛ ۱۹. لولهٔ خروج آب اولیه؛ ۲۰. تیغه؛ ۲۱. سوخت؛ ۲۲. ورق پخش آب در ورودی دل؛ ۲۳. ستون دستگاه؛ ۲۴. گذرگاه آلات و ابزار.



شکل ۱۱۱.دستگاه بخارساز رآکتور با آب تحت فشار.

۱. خروج بخار؛ ۲. خشک‌کنندهٔ بخار؛ ۳. جداکننده بخار از آب؛ ۴. ورود آب اصلی؛ ۵. ورود آب اولیه به رآکتور؛ ۶. خروج آب اولیه از رآکتور؛ ۷. صفحهٔ لوله‌خور؛ ۸. لوله‌آلات.

ماشینهای سوختگردان: این ماشینها می‌بایست بارزنی، تخلیه و دیگرکارهای جابه‌جاسازی عناصر سوختی را انجام دهند. این ماشینها که پس ازکمی کار بسیار رادیوآکتیو می‌شوند (در هر کیلوگرم U۲۳۵، میلیونها کوری) باید از دور فرمان بگیرند. آنها عناصرکار شده (یا فرسوده) را در ظرفهایی قرار می‌دهند تا امکان حمل آنها باشد. این ماشینها لزوماً بسیار سنگین هستند زیرا می‌بایست جلوی تابشهای نافذ شدید را بگیرند و گرمای آنها را از بین ببرند؛ ساخت آنها دشوار است چون باید بسیار نفوذناپذیر باشند و فرمانهای از دور را بپذیرند.

در رآکتورهای اورانیم طبیعی، معمولاً لازم است که سوختگردانی به‌هنگام اوج کار رآکتور انجام گیرد، اما در رآکتورهای نوع دیگر، این کار بسادگی در زمان توقف کار، یک بار در هر سال، همراه با تعمیرات اصلی است.

تنظیم، تأمین و اندازه‌گیری: قطعات تنظیم‌کننده، تأمین و تجهیزات اندازه‌گیری و وسایل الکترونیکی مربوط به آنها، حجمی بسیارکمتر دارند اما بسیار ظریفتر، اساسیتر و پیچیده‌تر هستند. در واقع رآکتورها درکار معمول خود بسیار پایدار می‌باشند و به‌هنگام بی‌نظمیهای تصادفی، ازجمله بالا رفتن سریع توان آنها (از ۰/۱ به ۱۰)، دلهای آنها به‌طوری طراحی و حساب شده‌اند که یک داغ شدن و حتی مقداری اتلاف مادهٔ خنک‌کننده، شدت رادیواکتیویته راکاهش می‌دهد و واکنش زنجیری متوقف می‌شود (پایداری سرشتی نوترونی). رآکتورهای آزمایشی متعددی برای نشان دادن چنین «تغییرات توان» ساخته و به‌کارگرفته شده‌اند و حتی آنها را در معرض «حوادث تعمدی» قرار داده‌اند، مثلاً با بیرون کشیدن یک دل کامل، یک عنصر سوختی را ضایع می‌کنند. باید بر اهمیت این نمایشها و نیز دشواری درک و تفسیر چنین آزمایشهایی روی مدلهای کوچک نمایشی انگشت گذارد.

زنجیرهای تنظیم (دوگانه یا سه‌گانه) (اندازه‌گیری ـ ثبت ـ فرمان الکتریکی ـ فرمان مکانیکی)، باید سریع و بدون اشکال باشند. کامپیوترها صدها عدد مختلف را، که هم روی قطعات هسته‌ای و هم روی اجزای معمولی نیروگاه تأثیر دارند گردآوری می‌کنند، آنها را تفسیر می‌کنند آن‌گاه به مکانیسمهای تنظیم، فرمان می‌دهند. وسایل خنک‌سازی و امنیت‌بخشی که می‌توانند به فوریت و با قوت عمل کنند نیز پیش‌بینی شده‌اند.

سپر بتونی: بازتابنده (یا روکش) و صندوق برای بیخطر کردن تابشهایی که با شکافت زنجیری همراه‌اند کافی نیست. این مجموعه باید با نوعی سپر حمایتی پوشیده شود که شدت تابشهای مختلف را بر $۱۰^{۹}$ یا برحسب مورد به $۱۰^{۱۱}$ تقسیم می‌کند و آن را برای شخصی که در معرض

آن است بیخطر می‌سازد؛ مقداری که از مقدار تابش رادیوآکتیو زمینی و کیهانی در نقاط مختلف زمین، کمی بیشتر است.

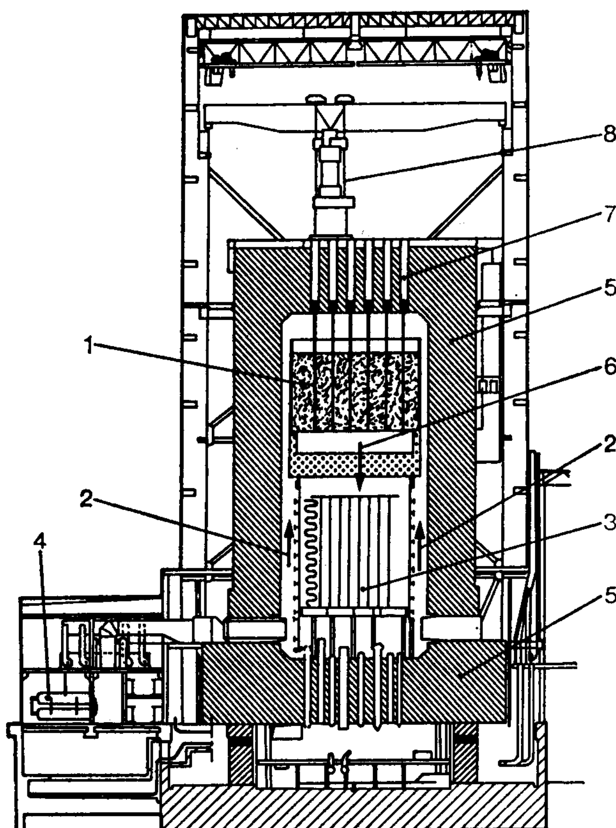
این سپر معمولاً دیوار ستبری (۰٫۵ ± ۲ متر) از بتون فشرده است. وجود آن مطمئناً عملیات سوخت‌گردانی را تسهیل نمی‌کند. نمی‌توان حتی فکر جادادن آن را در صندوقهای فولادی، داشت زیرا ساخت این صندوقها دشوارتر و پرهزینه‌تر از آن است که به میل خود اندازهٔ آنها را بیشتر کنند. اما صندوقهای ساخته شده از بتونهای پیش تنیده می‌توانند به‌طورکامل یا جزئی سپرهای حفاظتی به‌شمار آیند. افزایش بزرگی آنها به اندازهٔ صندوقهای فولادی دشوار و پرهزینه نیست. و نیز به برکت چنین صندوقهایی است که تصور نیروگاههای «مجتمع» قوت می‌گیرد، زیرا در اطاقی از بتون پیش تنیده، که گرچه ساخت آن‌هم دشوار است، اما دل، مبادله‌گرها، ماشینهای سوختگردان، وسایل تنظیم و تأمین جملگی در آن قرار دارند. از تنها منفذهای بزرگ این اطاق، علاوه‌بر توربینها، بعضی دستگاههای کمکی و تغذیه‌کننده‌های برقی را به مجموعهٔ رآکتور مربوط می‌سازند (شکل ۱۱۲).

برتری دیگر بتونهای پیش تنیده بر صندوق فولادی، وجود خطر کمتر اشتعال رآکتور در نتیجهٔ فشار زیادی است که نخستین شکاف را پدید می‌آورد.

پوشش نفوذناپذیر: در پایان باید گفت که هر رآکتور در پوشش نفوذناپذیری قرار دارد تا محتوی فراورده‌های رادیوآکتیو آن، در صورت وقوع حادثه‌ای نتوانند آزاد شوند. این پوششها به‌علت بزرگی زیاد: ۳۰ تا ۴۰ متر قطر، ۶۰ متر یا بیشتر ارتفاع و نیز این واقعیت که باید فشار زیادی (برحسب مورد ۰٫۱ تا چند اتمسفر) را تحمل کنند و نشت بسیارکمی داشته باشند (در هر روز ۱٪ یا کمتر)، هزینهٔ گزافی را ایجاب می‌کند. آنها تنها برای پوشش رآکتورهای «مجتمع»، رآکتورهایی که در آنها بتون پیش‌تنیده به‌کار رفته است و نیز برای رآکتورهای پژوهشی به‌کارگرفته می‌شوند که توان معمولی آنها چنان کم است که در صورت وقوع حادثه، مقدارکمی رادیواکتیویته منتشر می‌شود.

این پوشش نفوذناپذیر در تمام تأسیساتی که در مراحل پس از رآکتور قرار دارند و مواد دارای رادیواکتیویتهٔ زیاد را دست‌کاری می‌کنند به‌کارگرفته می‌شود.

زرههای ایمنی: بدین‌ترتیب، دیده می‌شود که بین محیط بیرونی نیروگاه و سوخت هسته‌ای آن، رادیواکتیویته شدیدی وجود دارد و به همین جهت سه زره ایمنی در آن فضا گذارده می‌شود: غلاف که سوخت را از گرمابر جدا می‌سازد؛ بین گرمابر اولیه و مدار آب ـ بخار که توربین را تغذیه می‌کند ظرف فولادی یا صندوق وجود دارد. زره سوم از نوعی کمربند امنیتی تشکیل می‌شود. در سیستمهای مجتمع و نیز در رآکتورهای با آب جوش و دارای مدار مستقیم، تنها دو زره امنیتی



شکل ۱۱۲.نمای عمودی یک رآکتور نیروگاه با اورانیم طبیعی، گرافیت، گازکربنیک.

۱. دل؛ ۲. گازکربنیک سرد (حدود $220\,^\circ C$)؛ ۳. مبادله‌گر دستگاه تبخیر؛ ۴. دَم کوره؛ ۵. روکش از بتون پیش تنیده به ارتفاع ۵۰ متر؛ ۶. گازکربنیک گرم(حدود $380\,^\circ C$)؛ ۷. مجراهای گذر سوخت، میله‌های تنظیم نمایان نیستند؛ ۸. دستگاه سوختگردانی.

وجود دارد: غلاف و کمربند امنیتی.

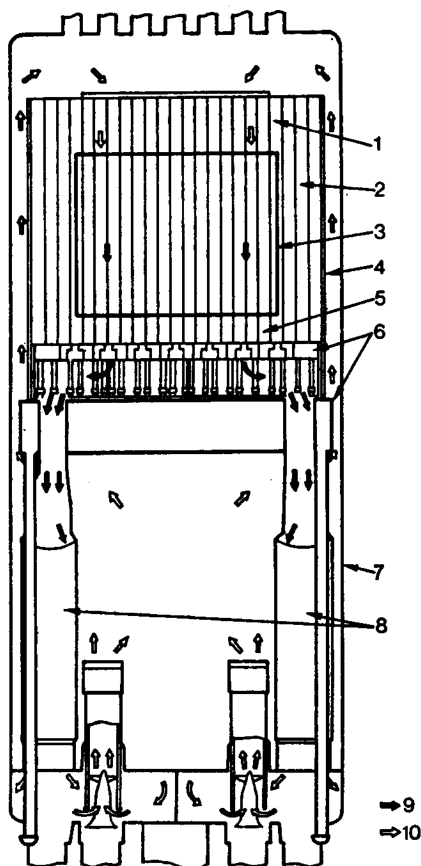
غلافها و صندوقها، علاوه‌بر کار آشکار خود، نقش امنیتی بسیار مهمی هم در کارخانه‌های هسته‌ای دارند که در نیروگاههای معمولی نیست و آن لوله‌های ردیفی و گنبدهای بخارساز است. طبیعتاً کار آنها بستگی به کیفیت مصالح، دقت در ساخت آنها و جدیتی دارد که در کنترل تکنیکها و چگونگی تنظیم کارگذاری، ساختمان و طرز کار همهٔ کارخانه‌های هسته‌ای و بالاخره، شرایطی دارد که در گذشته از آنها سخن رفت.

عناصر سوختی: این عناصر که درپی آزاد شدن انرژی پدید می‌آیند، از آنجا که غالباً اجزای متشکلهٔ خود دل می‌باشند اهمیت زیادی دارند. همهٔ رآکتورهای دارای ظرف فولادی و مادهٔ کندساز (یا گرمابر) مایع: رآکتورهای با آب و رآکتورهای سریع با سدیم مایع در این گروه جای دارند. همچنین رآکتورهای گرافیتی ـ گازی با دمای بالا چنین است. دراین‌صورت، باید توجه داشت که عناصر سوختی نه‌تنها فرادا، بلکه گروهی هم، چنین می‌باشند. تنها قطعات همیشگی دل عبارتند از به‌اصطلاح «دامن»هایی که دور آن را می‌پوشانند و صفحات (درکف و سقف) که عناصر سوختی را، نسبت به ظرف، در جای خود نگاه می‌دارند و در همان حال مسیر گرمابر را معین می‌کنند و اجازه می‌دهند که از سوراخهایی که در سقف یا، کف وجود دارند میله‌های تنظیم و ابزارهای اندازه‌گیری عبور کنند (شکلهای: ۱۱۳ و ۱۱۴ و ۱۱۵ و ۱۱۶).

از سوی دیگر، در رآکتورهای استوانه‌ای و در انواع دیگر رآکتورهای گرافیتی ـ گازی، عناصر سوختی در نوعی ساختار مکانیکی جای گرفته‌اند تا برای همهٔ عمر رآکتور دوام آورند (با اینکه تعمیرات اساسی، مانند تعویض لوله‌های رآکتور امکانپذیر است)..

این عناصر سوختی، مجزا یا با سرخوشه‌ای، کانال‌به‌کانال، معمولاً استوانه‌ای هستند. اما برعکس، آنهایی که باید به دل رآکتور تکیه داده شوند مخروطی شکل می‌باشند. گرچه هر دو گروه، معمولاً به‌شکل دسته‌ای از مدادهای سوختی فراهم آمده‌اند (شکلهای ۱۱۷ و ۱۱۸).

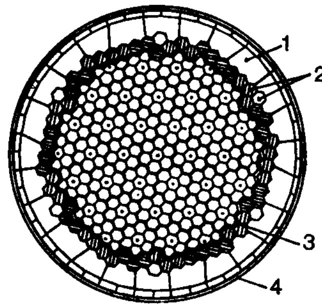
اورانیم فلزی: بنا به دلایل فیزیکی، اورانیم فلزی نخستین سوختی بود که به‌کار گرفته شد. چگالی بالا (۱۹ گرم برای هر سانتیمترمکعب) و رسانایی گرمایی نسبتاً خوب سبب گزینش آن شدند. با این‌همه، بخوبی شناخته شده نبود. در سال ۱۹۴۱ هنوز آن را به‌مقدار زیاد، بخصوص در مقیاس صنعتی تولید نمی‌کردند. از دمای ذوب آن اطلاع دقیقی نداشتند (بین $1100\ ^{\circ}C$، که عدد درستی بود و $1800\ ^{\circ}C$؛ زیرا گرد موجود در آن زمان چنان اکسید شده بود که اندازه‌گیری این دما، مفهوم چندانی نداشت). مسألهٔ آماده‌سازی آن بسیار سریع حل شد. اما مشکلات دیگری در راه



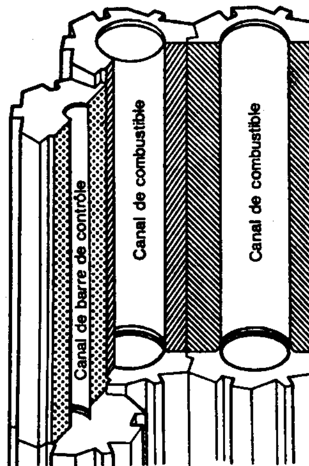
شکل ۱۱۳.رآکتور گرافیتی ـ هلیمی با دمای بالا، در ممالک متحدهٔ امریکا.

این شکل را با شکلهای ۱۰۶ و ۱۱۲ مقایسه کنید. صندوق بتونی در این شکل نشان داده نشده است.

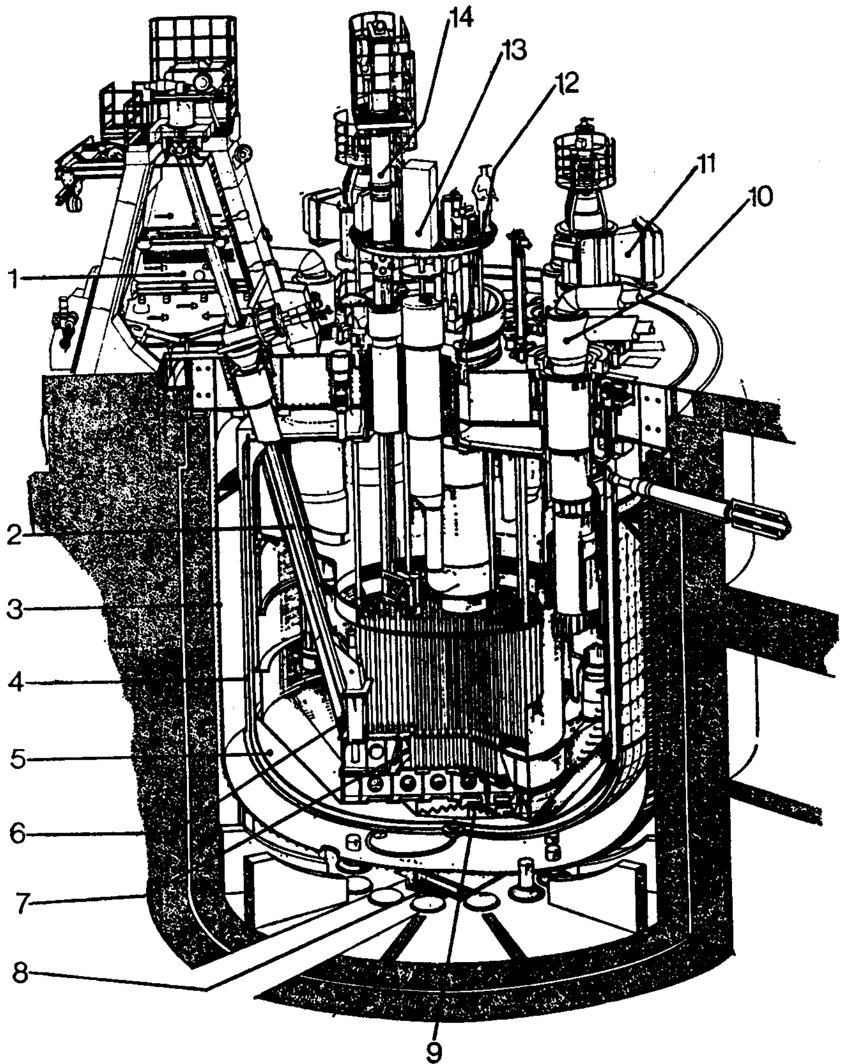
۱. بازتابندهٔ بالایی؛ ۲. بازتابندهٔ پهلویی؛ ۳. دل؛ ۴. کرست فولادی؛ ۵. بازتابندهٔ زیری؛ ۶. تکیه‌گاه دل؛ ۷. زره درون صندوق؛ ۸. مبادله‌گر گرما؛ ۹. جریان هلیم گرم؛ ۱۰. جریان هلیم سرد.



شکل ۱۱۴.رآکتور گرافیتی ـ هلیمی با دمای بالا، مقطع افقی دل.
۱. قطعات‌گرافیت؛ ۲. مخروطهای گرافیتی بازتابنده؛ ۳. مرزهای دل؛ ۴. کرست فولادی.

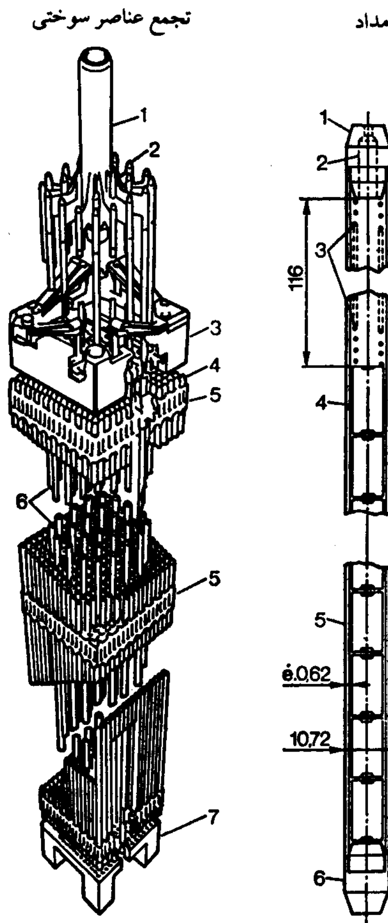


شکل ۱۱۵.رآکتور گرافیتی ـ هلیمی با دمای بالا.
نمای تجمع قطعات گرافیت کندساز، میله‌های تنظیم یا قطعات سوختی درکانالها جاسازی شده‌اند (آنها را با فشار به‌شکل استوانه درآورده‌اند و حبه‌های سوخت در زمینهٔ کربنی پخته شده‌اند).



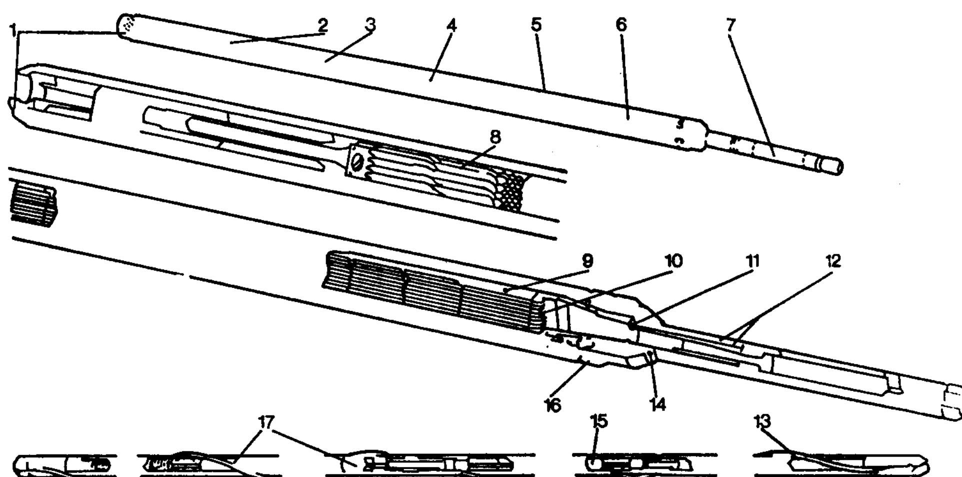
شکل ۱۱۶.رآکتور با نوترون سریع Phenix ۲۵۰ MWé، مارکول فرانسه.

۱. سرند از عنصر سوختی؛ ۲. شیب اصلی انتقال سوخت؛۳. ظرف کمربندی اول؛ ۴. لفاف دوتایی؛ ۵. ظرف فلزی اصلی؛ ۶. ظرف اولیه؛ ۷. سکوی رآکتور؛ ۸. محفظهٔ پیمانه‌های نوترونی؛ ۹. خاکستردان؛ ۱۰. مبادله‌گر گرما؛ ۱۱. موتور پمپ سدیم مایع؛ ۱۳. میله‌های تنظیم؛ ۱۴. بازوی انتقال‌دهندهٔ عناصر سوختی.



شکل ۱۱۷.مدادهای سوختی و تجمع آنها در رآکتور با آب تحت فشار.

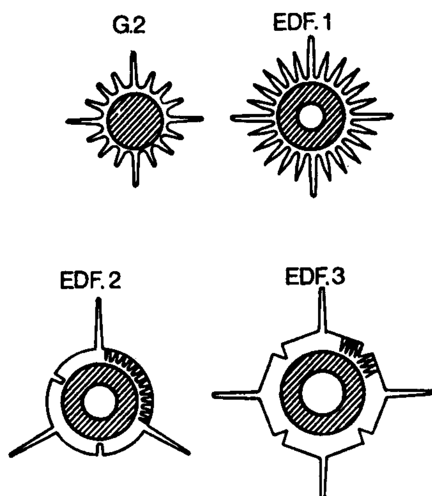
راست: مداد. ۱. سرپوش بالایی؛ ۲. روزنه برای تزریق هلیم؛ ۳. فنر؛ ۴. پاستیل در همجوش UO_2؛ ۵. غلافی از آلیاژ زیرکالوی؛ ۶. محفظهٔ انبساط. اندازه‌ها به میلیمتر می‌باشند؛ طول کلی مداد سه متر است. چپ: تجمع مدادها. ۱. ساق میلهٔ تنظیم؛ ۲. مداد جذب‌کننده؛ ۳. قطعه انتهایی بالا ۴. مداد سوختی؛ ۵. پنجره؛ ۶. لولهٔ هدایت‌کننده مداد جذب‌کننده؛ ۷. قطعهٔ انتهایی پایین.



شکل ۱۱۸.تجمع عناصر سوختی در رآکتور فنیکس.
۱. قطعهٔ‌گیرنده؛ ۲. حفاظ نوترونی بالا؛ ۳، ۸ و ۱۵. پوشش محوری UO_2؛ ۴ و ۹ و ۱۷. دل (UO_2+PuO_2)؛ ۵. لولهٔ ششگوش؛ ۶. پوشش محوری پایین (UO_2)؛ ۷. پایه؛ ۱۰ ریل؛ ۱۱. دیافراگم برای تنظیم مقدار بدهٔ سدیم مایع؛ ۱۲. سوراخ عبور سدیم؛ ۱۳. سیم مارپیچی برای جدا کردن مدادها؛ ۱۴. سوراخ گرد؛ ۱۶. بادامک راهنما.

بودند. از یکسو، این فلز جز در نوع پایدار موجود در دمای بالا ـ ناهمسانگرد (آنیزوتروپ) است؛ از سوی دیگر، همین‌که دما کمی بالا رود بسیار واکنش‌دهنده می‌شود. این فلز، نه‌تنها در تماس با گرمابرهای معمولی (آب، گازکربنیک) اکسید می‌شد بلکه با فلزات دیگر هم، بویژه با آلومینیم، که تهیهٔ خالص و ماشین‌کاری آن به‌علت جذب کم نوترونی آن، آسان است و برای اجرای نقش غلاف، ایدآل می‌نماید واکنش می‌دهد. بالاخره اورانیم بین دماهای ۶۰۰ و نقطهٔ ذوب $۱۰۸۰\,^\circ C$، همراه با افزایش وزن متحمل چندین تبدل آلوتروپی می‌شود. این معایب، با آلیاژسازی کاهش می‌یابند، اما رفع نمی‌شوند. آلیاژسازی با عناصری انجام می‌گرفت که بسیار جذب‌کننده نوترون باشند تا کاربرد اورانیمی که از U۲۳۵ غنی ناشده بود، لااقل با دشواری هم که شده، عملی باشد.

باوجوداین، توانستند از اورانیم فلزی با غلاف آلومینیمی در رآکتورهای بزرگ اولیه پلوتونیم‌زای دارای گرافیت که با آب خنک می‌شدند استفاده کنند. این رآکتورها در حالت خنک کار می‌کردند

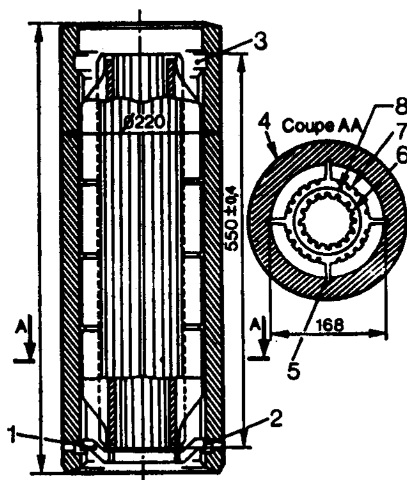


شکل ۱۱۹.تحول عناصر سوختی.
رآکتورهای فرانسوی با اورانیم طبیعی ـ گاز کربنیک.
در فاصلهٔ سالهای ۱۹۵۵ ـ ۱۹۷۰، میله‌های توپر اورانیمی به میله‌های توخالی تبدیل شدند. در این حالت، پره‌کاری غلاف دشوار است.

و از تولید انرژی قابل استفاده ناتوان بودند.

رآکتورهای صنعتی گرافیتی ـ گازی با اورانیم طبیعی، اکنون از سوختهایی استفاده می‌کنند که از یک لولهٔ اورانیم کمی آلیاژی ـ تشکیل شده‌اند و مغزی از گرافیت دارند. غلاف منیزیمی (دارای کمی زیرکونیم یا آلومینیم و بریلیم) پره‌ها و شیارهایی دارد که هم عنصر سوختی را در کانال دل راهنمایی می‌کند و هم در سطح تماس خود با گاز گرمابر، هیجان لازم برای انتقال گرما را فراهم می‌سازد (شکلهای ۱۱۹ و ۱۲۰).

آب سنگین یا اورانیم غنی شده: در استفاده از آب سنگین به‌عنوان کندساز، یا (با) اورانیم غنی شده به‌عنوان مادهٔ شکافت‌پذیر، امکان تعویض اورانیم فلزی با $UO_۲$ وجود دارد. و نیز می‌توان خاطرنشان ساخت که، از نظر تاریخی، رآکتورهای پژوهشی اولیه با آب سنگین از اورانیم فلزی استفاده می‌کردند و نیز، برعکس، بخشی از سوخت اولیهٔ همه رآکتورها، ازجمله رآکتور فرمی در شیکاگو، در دسامبر ۱۹۴۲ اکسید $U_۳O_۸$ بود. در آن زمان بعضی مصالح گران‌قیمت (مانند آب



شکل ۱۲۰.وضع کنونی یک عنصر سوختی در Bugey I.
مدل این رآکتور، دارای غلافهایی بمنظور خنک‌سازی درون و بیرون آن است.
۱. زین؛ ۲. پایه؛ ۳. گلویی قطعهٔ گیرنده؛ ۴. پوشش گرافیتی؛ ۵. پرهٔ هدایت‌کننده به گلویی؛ ۶. غلاف درونی؛ ۷. غلاف بیرونی؛ ۸. میلهٔ اورانیمی با مقطع گرد. اندازه‌ها برحسب میلیمتر است.

سنگین) بودند؛ و به‌علت جوان بودن این تکنولوژی، اورانیم فلزی یا $UO_۲$ در دسترس نبود. اما ناگزیر باید هرچه زودتر، رآکتورها ساخته می‌شدند. و بنابراین، می‌بایست مدلهایی را در نظر گیرند که از مقدار موجود به بهترین صورت استفاده شود.

اکسیداورانیم: در سال ۱۹۶۰، اکسید $UO_۲$ در همجوش، عنصر سوختی تقریباً همه رآکتورها بود. توانستند پیش‌بینی کنند که ترکیبات دیگری مانند UC یا USi که سنگینتر و گرما رسانایی بیشتری دارد رفته‌رفته در بعضی از رآکتورهایی که هنوز به مرحلهٔ صنعتی نرسیده بودند جای $UO_۲$ را بگیرند. اما در مورد رآکتورهای با آب، معمولی یا سنگین، هیچ چیز جای $UO_۲$ را نمی‌گیرد. پس این رآکتورها بازار را به‌دست گرفتند و تا مدتها سلطهٔ آنان ادامه یافت (جدول II).

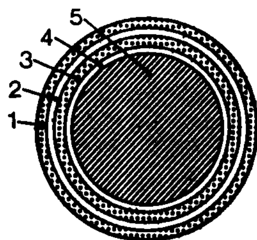
اکسید $UO_۲$ با چگالی میانگین (U/lg · at۴۴) و رسانایی گرمایی پایین و نیز نقطه ذوب بالا (۲۶۰۰°C)، ساختاری بلورین همسانگرد دارد اما فاقد تبدلات آلوتروپی است و واکنش‌پذیری شیمیایی آن کم است. جالب اینکه آب گرم باکندی زیاد آن را اکسید می‌کند، به‌طوری‌که یک عیب کوچک غلاف اهمیت چندانی ندارد، درحالی‌که مداد سوختی را بسرعت خراب می‌کند و در نتیجه

چنانچه اورانیم فلزی یا UC به‌کار رفته باشد آلودگی رادیوآکتیو در مدار اولیه، جدی خواهد بود.

تهیهٔ UO_2 آسان است و آن را تنها به‌شکل پاستیلهای در همجوش با قطرهای ۷ تا ۲۰ میلیمتر و ارتفاعی مشابه، بسته به اینکه برای چه رآکتوری باشد ـ به‌کار می‌برند. این پاستیلها را در غلافها روی هم می‌چینند تا مدادهای سوختی را تشکیل دهند و پس از اینکه در زیر فشار مختصری از هلیم قرار داده شدند آنها را لاک و مهر می‌کنند. مدادها به دسته‌هایی ۱۵ × ۱۵ یا ۱۷ × ۱۷، مثلاً در PWR تقسیم می‌شوند. این دسته‌های مداد را در جعبه‌های کم‌وبیش مشبک قرارمی‌دهند و در صورت لزوم برای آلات اندازه‌گیری یا وسایل تنظیم، جایی را خالی می‌گذارند. با تجمع این جعبه‌ها، کل دل تشکیل می‌شود. از آنجا که مقدار جذب نوترونها به توسط هسته‌هایی که نه شکافت‌پذیر و نه بارآور هستند در دل رآکتور حتی‌المقدور باید کم شود، غلافها و جعبه‌ها باید کمی خاصیت گیراندازی نوترون داشته باشند و، درعین‌حال دارای خواص مکانیکی خوب و در برابر خورندگی مادهٔ گرمابر هم مقاوم باشند. مدتها این وسوسه وجود داشت که بریلیم را سازگار کنند اما، هیچ‌گاه نتوانستند آن را به‌شکل کاملاً نرم با بهای مناسب به‌دست‌آورند. عنصر زیرکونیم که هافینم آن را، که با خواص مشابهی در طبیعت همراه آن است، از آن جدا کرده باشند، در برابر نوترونها بسیار شفاف است و تولید صنعتی آن بمنظور انرژی هسته‌ای بوده است. این عنصر به‌شکل آلیاژهای محتوی کمی قلع، آهن و غیره بسیار آسانتر به‌کار گرفته می‌شود و بنابراین مورد استفاده است. بدون آن، ساخت رآکتورهای با آب سنگین و اکسید طبیعی اورانیم، میسر نبود. از آن، لوله‌های خنک‌کنندهٔ تحت فشار، غلافها، صفحات تجمع دسته‌های مداد را ساخته‌اند. اما در دل رآکتورهای با آب معمولی، آلیاژهای زیرکالوی را با احتیاط تمام جانشین فولادهای زنگناپذیر کردند؛ درحالی‌که سازندگان و استفاده‌کنندگان از این نوع رآکتورها، غنی سازی رشدیابندهٔ سوخت را با U۲۳۵ به‌علت خاصیت اکسید ناشدنی آن پذیرفته‌اند. در مورد رآکتورهای با نوترونهای سریع می‌توان از مدادهای UO_2 با غلافهایی از فولاد زنگناپذیر استفاده کرد.

میکروسفرولها برای رآکتورهای با دمای بالا: رآکتورهای با دمای بالا که گرافیت، کندساز و هلیم، خنک‌کنندهٔ آنهاست (زیرا در دمای بالا خود CO_2 همراه با CO یا CH_4 گرافیت را می‌خورد)، از UO_2 به‌شکل خاصی استفاده می‌کنند که آن را میکروسفرول می‌نامند؛ زیرا قطر آنها چند صدم میکرون است.

این سفرولها که به روش بستر سیال آسان به‌دست می‌آیند، با روشهای مشابهی، با لایه‌های پشت سر هم پیروکربن با بافتهای مختلف لفاف می‌شوند و گاهی هم لایه‌ای از SiC در میان آنها



شکل ۱۲۱.مقطع یک گویچهٔ سوختی.
۱. پیرو کربن با چگالی زیاد؛ ۲. کربید سیلیسیم؛ ۳. پیرو کربن با چگالی زیاد؛ ۴. پیرو کربن پوک و لایهٔ نفوذناپذیر؛ ۵. سفرول UO_2 در همجوش (قطر کلی چند میلیمتر).

وارد می‌کنند. «ذرات لفاف شده» متراکم در خمیر گرافیت، بعداً گرافیتی شده و در قطعات گرافیتی تشکیل‌دهندهٔ دل رآکتور، وارد می‌شوند (شکل ۱۲۱). دو نوع از آن، یکی با ساختمان مخروطی صلب و دیگری به‌شکل گویچه‌های گردان مورد آزمایش قرارگرفتند. هر دو نوع آنها بتدریج صنعتی شدند.

در این‌جا، پوسته‌های پشت سر هم که روی گویچه‌ها نشسته‌اند، غلاف را می‌سازند. و فرایند تراکم و گرافیت شدن آن را تقویت می‌کنند. این روش، کارایی بسیار از خود نشان داد. ذرات لفاف شده بدون اینکه امکان فرار از فراورده‌های شکافت را داشته باشند تابشهای شدیدی را تحمل می‌کنند و نسبت به ضربه‌های گرما هم حساس نیستند. با این روش، آرایشی نسبتاً همگن، در مقیاس مسافتهای آزاد نوترونها، سوخت و کندساز ایجاد می‌شود، چیزی که برای تشکیل پلوتونیم مساعد است. رآکتورها با به‌کارگرفتن چنین سوختهایی و مصرف، مثلاً U۲۳۵ و تولید نسبتاً فراوان PU یا U۲۳۳، می‌بایست «تبدیلگر»های خوبی برای مادهٔ شکافت‌پذیر باشند.

این نمونهٔ خوبی، اگر برای تحول تکنیکها نباشد، لااقل برای تحول مفاهیم در مسیر پیشرفت یک تکنیک است. از سال ۱۹۴۵ رغبت به رآکتورهای دارای دمای بالا بتدریج زیاد شد. رشتهٔ اندیشه‌ها ساده بود. شکافت هسته، به‌دست آمدن گرمای با دمای بسیار بالا را، اصولاً ممکن می‌سازد. از این واقعیت، به‌علت محدودیتهای مربوط به خصوصیتهای مواد (دمای ذوب، پایداری ترمومکانیکی، خورندگی، گیراندازی نوترونها و غیره)، که اورانیم فلزی یا غلافهای متالیک با آنها سروکار دارند، استفاده نمی‌شد. بنابراین، ناچار درپی یافتن رآکتورهای «کاملاً نسوز» برآمدند. مادهٔ کندساز می‌تواند گلوسین (بریلیم) یا گرافیت باشد؛ مادهٔ سوختی می‌تواند یک اکسید یا یک کربید

جدول ۳.خصوصیات تقریبی انواع رآکتورها در سال ۱۹۷۶

نوع رآکتور	قدرت هر واحد (MWé)	میانگین قدرت گرمادهی در دل رآکتور kW(th)/l	میانگین قدرت گرمادهی در دل رآکتور kW(th) به کیلوگرم سوخت	میانگین قدرت گرمادهی در دل رآکتور kW(th) بهکیلوگرم ماده شکافتپذیر	ضریب اولیهٔ تبدیل	سوخت[3]	کاربرد سوخت به MWj(th)/t	مقدار نیاز به MWé در سال: کیلوگرم U طبیعی	مقدار نیاز به MWé در سال: UTS	گرم پلوتونیم[4] که با MWé در سال تولید شده است
گرافیت ـ گاز[1]	۴۷۵	۱/۱	۳/۷	۵۲۰	۰/۸	U فلزی طبیعی	۴۰۰۰	۳۰۰		۶۰۰
گرافیت ـ گاز پیشرفته[2]	۶۰۰	۲/۵	۱۳/۵	۶۶۰	۰/۴۵	٪(۲/۳)UO_2	۱۷۵۰۰	۱۶۵	۱۲۰	۱۸۵
گرافیت ـ گاز دمای زیاد[2]	۳۳۰	۸	۷۵	۷۵۰	۰/۷	UC_2 بسیار غنی+ThO_2	۹۵۰۰۰	۹۰	۱۰۰	۲۵۰[5]
آب سنگین[1]	۵۰۰	۱۵ـ۱۰	۲۴	۳۰۰۰	۰/۸	UO_2 طبیعی	۷۵۰۰	۱۷۰		۴۶۰
آب سنگین، آب معمولی جوشان[1]	۶۵۰	۱۱	۲۰	۱۰۰۰	۰/۵۵	٪(۲.۲) UO_2	۲۲۰۰۰	۱۸۰	۱۲۰	۲۶۰
آب تحت فشار[1]	۹۵۰	۱۰۰	۳۷	۱۳۵۰	۰/۵۵	٪(۳/۲) UO_2	۳۳۰۰۰	۲۰۰	۱۴۰	۲۴۰
آب جوشان[1]	۱۰۰۰	۵۰	۲۱	۹۵۰	۰/۵۵	٪(۲/۷۵)UO_2	۲۷۵۰۰	۱۹۰	۱۳۰	۲۳۰
سدیم سریع[2]	۱۰۰۰	۱۵۰ـ۱۰۰	۱۵۰ـ۱۰۰	۹۰۰ـ۶۰۰	۱/۴ـ۱/۳	(٪۲۰) PuO_2 +UO_2 طبیعی (٪۸۰)	۱۰۰۰۰۰	۱/۲[4]		۱۳۵۰

۱. بازدهٔ ترمودینامیکی ۳۰ـ۳۴٪
۲. بازدهٔ ترمودینامیکی ۴۰ـ۴۵٪
۳. مقادیر بین پرانتزها، درصد اولیه در U۲۳۵ سوخت با کار معمولی است
۴. معادل Pu۲۳۹ گرفته شده است
۵. U۲۳۳

اورانیم باشد که غلافی از گرافیت دارد و مادهٔ گرمابر، هلیمی است که از نظر شیمیایی خنثی است. بریلیم به کناری گذاشته شد (بهای گزاف و دشواری تولید) و گرافیت ماند. اما در سالهای ۱۹۵۰ ـ ۱۹۵۵ گرافیت هسته‌ای صنعتی پوک بود. بنابراین می‌بایست یک آلایش مهم مدار اولیه بوسیلهٔ فراورده‌های شکافتی را پذیرفت. این فراورده‌ها بدون دشواری زیاد، از هلیم جدا می‌شوند و با ناپدید شدن از دل رآکتور، نوترونها را گیر نمی‌اندازند. چنین وضعی ضریب تبدیل U۲۳۸ به Pu۲۳۹ را بهتر خواهد کرد و به عمر سوخت در هسته خواهد افزود. مبانی طرح چنین رآکتوری بنابراین چنین است: عنصر سوختی که برای بیرون کردن فراورده‌های شکافتی می‌کوشد؛ یک مدار اولیهٔ بسیار آلوده، که سیستم پیشرفته‌ای برای خالص‌سازی هلیم لازم دارد؛ یک مبادله‌گر، که مانع هرگونه نشت رادیوآکتیو، در مدار ثانوی شود. در جریان پیاده کردن طرحها، این مبانی بکلی واژگون شدند و معلوم شد که اصول نقشه ماشینها اختراع ذرات لفاف شده و نیز اختراع گرافیتها صنعتی غیر پوک، که بیش از همه مرهون صنعت فضانوردی است را می‌توان با آن سازش داد و با نگاهداری کامل فراورده‌های شکافت و به‌حساب کاهش ضریب تبدیل، رآکتورهایی ساخته شد که مدار اولیهٔ آنها خلوص فوق‌العاده‌ای دارد. به این ترتیب، در گذر از رآکتورهای نمایشی به مدلهای صنعتی توانستند هم مبادله‌گر را بسیار سبک و ساده کنند و هم خالص‌کننده‌های مدار اولیه را.

خلوص مواد: اهمیت خلوص مواد نیز در رشته هسته‌ای دست‌خوش دگرگونیهای فراوانی بوده است. در آغاز، زمانی‌که تنها با سیستمهایی با مقدار رآکتیوتیهٔ کم سروکار داشتند یا حتی آن‌گاه که از وجود واکنش زنجیری بی‌خبر بودند، بهتر می‌دانستند که از موادی استفاده کنند که قدرت جذب نوترونی انگل آنها هرچه کمتر باشد. این اقتضای جدید، همراه با گوناگونی فراوان گیراندازی نوترونها بوسیلهٔ نوکلئیدهای مختلف سبب شد که عناصری که غالباً زیاد شناخته شده نبودند یا شیمی دشواری داشتند، ازقبیل خاکهای کمیاب یا بور، اهمیت یابند. می‌بایست بتوان آنها را حذف کرد ـ و نخست آنها را اندازه‌گرفت ـ و مقدار آنها را به کمتر از 10^{-5} یا 10^{-6} کاهش داد، کاری که در نمونه‌های مربوط به اندازه‌گیری دقیق جرم اتمی انجام نمی‌گیرد، اما در تولید جاری روی صدها تن مواد باید رعایت شود. بسیار ساده و سریع نتیجه گرفته شد که می‌توان آن را پیشگویی کرد و بدین‌ترتیب، قدرت روشهای شیمیایی یا فیزیکی شیمیایی فزونی گرفت، رشته‌هایی که در آن زمان پیشگام بودند (تکنیکهای میکروشیمیایی، استخراج به کمک حلالهای آلی، تبادل یونی)، و از آن پس عمومیت یافتند.

امکان به‌کار گرفتن سوختهای غنی، سبب شد که کار ارزیابی جذبهای نوترونی انگل، گسترش

بسیار یابد. این کار سبب شد که هزینهٔ مربوط به تکمیل تکنیکهای دیگر را ارزش غنی‌سازی جبران کند. «خلوص هسته‌ای» از مرتبهٔ لزوم مطلق به مرتبهٔ عنصر ساده‌ای از یک سازش فنی ـ اقتصادی سقوط کرد. اما با شکلهای دیگری باز به صحنه آمد، مثلاً همراه با آلودگی رادیوآکتیو یا با خواص مواد؛ و ما به ارائه چند مثال اکتفا می‌کنیم. عنصر کبالت معمولاً در کانیهای آن با نیکل همراه است و در مرحله آماده‌سازی متالورژیکی آن، مقدار کبالت زیاد است. تحت تأثیر نوترونها، کبالت یک ایزوتوپ (^{60}CO) با نیم عمر بسیار طولانی (پنج سال) می‌دهد و در ضمن تابش گامای نافذی دارد. بنابراین، در برخی کاربردهای هسته‌ای، صرفه در به‌کار گرفتن نیکلی است که مقدار کبالت آن بسیار کمتر از مقدار نیکل معمولی باشد. در نیروگاههای هسته‌ای باید با کمال دقت از خورندگی جلوگرفت. در واقع از یک‌سوی غلافهای مدادهای سوختی، که اهمیت حیاتی آنها نموده شد برای بهتر شدن تراز نوترونی بسیار نازک هستند و ازسوی‌دیگر، فراورده‌های خوردگی در سراسر مدار اولیه نفوذ می‌کنند و با رادیواکتیویتهٔ خود سبب می‌شوند که عملیات نگاه‌داری یا تعمیر، که اساساً بسیار ساده هستند بسیار دشوار گردند. این امر به مشکلات شیمیایی بسیار جدی، چه دربارهٔ فلزات ساختمان رآکتور (فولادهای با درصد بسیارکم کربن، کمتر در معرض خوردگی هستند)، چه برای آب منجر خواهد شد. دربارهٔ آب باید گفت که مقدار کلر نباید از 10^{-6} بیشتر باشد تا خورندگی بین ذره‌ای فولادهای زنگ‌ناپذیر یا هیدرید شدن زیرکونیم اتفاق نیافتد. می‌بایست به همان دلایل مقدار pH را بدقت کنترل کرد. تجزیهٔ رادیولیتیک آب با درصد کلی ناخالصیها نسبت مستقیم دارد.

تأثیر تابشها: این تأثیر روی مواد، در صنعت هسته‌ای، مشکلی تازه و بسیار جدی است. این تابشها در رآکتورها و درکارخانه‌های هسته‌ای، فوتونها (تابشهای X و تابشهای γ) و تابشهای ویژه (الکترونها و نوترونها) هستند. آنها در ماده‌ای که از آن گذر می‌کنند آثار گوناگون و غالباً همزمان را سبب می‌شوند:

آثار هسته‌ای: شکافت و گیراندازی نوترونی، برای نوترونها. واکنشهای فوتوهسته‌ای برای تابشهای γ دارای انرژی زیاد (در موارد مورد بررسی ما، این واکنشها دربرابر واکنشهای مربوط به نوترونها قابل توجه نیستند)؛

آثار فیزیکو ـ شیمیایی: واکنشهای شیمیایی که اساساً در اثر تابشهای β و γ ایجاد می‌شوند (مثلاً، رادیولیز آب، پولیمریزاسیون مواد خنک‌کنندهٔ آلی، غیره). غالباً این فرایندها را با تعداد G مولکولهای درهم شکسته (یا تشکیل شده) در هر ۱۰۰eV انرژی جذب شده تخمین می‌زنند. تشکیل یک جفت (یون + الکترون) غالباً متضمن حدود ۳۰eV می‌باشد. تعداد G بسیار تغییر پذیر

است و عدهٔ ۰٫۱ تا ۵ اکثریت دارد)؛

آثار جهشها، که واکنشهای هسته‌ای: (n, γ)، سپس رادیواکتیویته، (n, α)، (n, p)، (n, f) را در مادهٔ عناصری که قبلاً نبودند وارد می‌کنند؛

آثار تغییر ساختارهای بلورین، اکثراً بوسیلهٔ ضربات نوترونهای سریع و پاره‌های شکافتی، که اتمها را از مواضع تعادلی خود در شبکه‌های بلورین جابه‌جا می‌کند (اثرویگنر)[1] الکترونهای اولیه (تابشهای β) و ثانوی (الکترونهایی که تابشهای γ آنها را جابه‌جا کرده است)، مقدار کمی از این تأثیر را دارند.

مشکل فراورده‌های شکافت: در سوختهای هسته‌ای، شکافت به‌جای یک اتم U دو اتم از فراورده‌های شکافتی ایجاد می‌کند که تابشهای یونی آنها، به‌طور متوسط، بالاتر از تابشهای U هستند. در همان حال یک اتم U تقریباً به پلوتونیم تبدیل شده است.

به‌عنوان نمونه، سوختهای رآکتورهای با آب حدود ۲۰۰۰۰MWJ/t تولید می‌کنند که مربوط به شکافت ۲٪ اورانیم اولیه (یا U + Pu) می‌شود. در آزمایش حدود پنج برابر این مقدار به‌دست آمده است و امید می‌رود که در رآکتورهای با نوترونها سریع این درصد به‌طور صنعتی به‌دست آید. دراین‌حال حال، برای ۱۰۰ اتم اولیه، در پایان از آن ۱۲۰ خواهند داشت که از نظر شیمیایی ۳۰ عدد با رقم ۱۰۰ اولیه اختلاف دارد؛

چنانچه تفاوت فراورده‌های شکافتی (۳۰تایی عنصر) را به‌حساب آورند دیده می‌شود که سوخت هسته‌ای، کمی پس از آغاز شدن کارش، بکلی چیز دیگری شده است. حتی چنانچه همهٔ فراورده‌های جدیدی که تشکیل شده‌اند بتوانند در حالت محلول جامد بمانند، باز همه خواص آنها محسوساً تغییر خواهند یافت و معلوم است که تا چه اندازه فلزها و سرامیکها دربرابر ناخالصیها، حساس هستند. بخصوص ۱۲٪ (اتمی) از فراورده‌های شکافتی، از گازهای کمیاب هستند که حلالیت آنها در U یا UO_2 صفر است. بنابراین، آنها از فلز یا از سرامیک فرار می‌کنند، بخشی اتم به اتم نفوذ می‌کنند و نیز پیش از اینکه به سطح برسند گویچه‌هایی تشکیل می‌دهند.

وانگهی فراورده‌های شکافتی، به‌شکل انرژی جنبشی، ۸۳٪ انرژی شکافتی را با خود می‌برند. این انرژی به‌شکل گرما، از طریق تصادم با اتمهای مجاور، در طول مسیر بسیار کوتاه، حدود ۰٫۰۱ میلیمتر، از بین می‌رود. اتمهای مورد تصادم از موضع تعادلی خود خارج می‌شوند (10^7 تا 10^8 در هر شکافت، زیرا این فراورده‌ها ۱۶۰MeV را با خود می‌برند و انرژی ارتباط شبکه‌ای حدود

۱. Wigner یوجین پاول ۱۹۰۲ ـ فیزیکدان امریکایی متولد مجارستان، که در سال ۱۹۳۰ به امریکا آمد و در ۱۹۶۳ همراه با م. مایر و هـ. نیزن موفق به دریافت جایزهٔ نوبل شد. ـ م.

چند eV بیش نیست). بسیاری از آنها فرو می‌افتند، زیرا در این به‌اصطلاح «داغ‌زدگی» که خط سیر یک پارهٔ شکافتی ایجاد کرده است می‌توان ادعا کرد که جسم اگر نه تبخیر شده باشد، به حالت مایع درآمده است و در شرایطی که می‌توان در تشبیه با عملیات جاری، سردکردن و باز پخت همزمان؛ توصیف شود به حالت جامد باز می‌گردد. با این‌همه تعداد جابه‌جایی می‌ماند که آنها را ۱۰۰۰ عدد در هر شکافت تخمین می‌زنند.

بدین‌ترتیب آسان می‌توان فهمید که مواد سوختنی طی اقامت خود در رآکتور، حتی بدون الزامات ترمودینامیکی ناشی از ساخت آنها در سرما و کاربرد آنها در گرما و ضربات گرمایی ناشی از وقفه‌ها و به‌کار افتادنهای مکرر ماشین، تغییر شکلهای فراوان دارند.

تغییر شکلهای اورانیم: اورانیم فلزی بخصوص به‌علت ناهمسانگردی (آنیزوتروپی) فاز α راست‌گوشهٔ (ارتورومبیک) آن، که در دمای پایینتر از $665^\circ C$ درجه پایدار است و نیز استحکام مکانیکی کمی که دارد آمادهٔ تغییر شکل است. این اورانیم در دمای پایینتر از $450^\circ C$ بدون اینکه چگالی آن تغییر کند تغییر شکل می‌دهد. در بالاتر از این دما، چگالی آن کم می‌شود و نوعی تورم در آن پدید می‌آید که‌اصولاً مربوط به تشکیل گویچه‌های فراورده‌های شکافت گازی است. گرما رسانایی آن در هنگام تابش کاهش می‌یابد و این امر چگالی توان مجاز را پایین می‌آورد زیرا دمای بیشینه، اکیداً محدود شده است.

این معایب بسیار جدی ـ اگر نگوییم منتفی‌کننده ـ را می‌توان از دو راه کاهش داد. تصرفات گرمایی (سرد کردن سریع در دمایی که فلز در فاز β یا γ است) و عملیات مکانیکی (چکشکاری) که ساختاری با دانه‌های بسیار ریز با جهتگیریهای تصادفی بدان می‌بخشد و در مقابل، نوعی شبه همسانگرد (ایزوتروپی) ایجاد می‌کند. اضافه کردن عناصر آلیاژی (Nb ،Mo ،Zr ،Cr) این ساختار ظریفدانه را پایدار می‌سازد. حتی اگر نسبت این مواد اضافی را بالا برند، منطقه وجود فاز γ، تا دمای معمولی هم همسانگرد باقی می‌ماند. در همان حال پایداری آن در برابر آب بیشتر می‌شود. اما همهٔ این عناصر آلیاژی (جز Zr که چندان مؤثر نیست) نوترونها را بشدت گیرمی‌اندازند و چگالی را پایین می‌آورند.

تمام اینها موجب محدودیت جدی تابش کلی می‌شوند که می‌توانند عناصر سوختنی با پایه اورانیم فلزی را تحمل کنند وکنارگذاشتن این سوخت و همراه با آن، خانوادهٔ رآکتورهای گرافیتی ـ گازی با اورانیم طبیعی را به‌مقدار زیادی توجیه می‌کند.

مزایای اکسید اورانیم: این اکسید، بسیار پایدار است. از یکسوی همسانگرد است و ازسوی‌دیگر، زمانی‌که از راه همجوشی بدان شکل بدهند دارای تخلخل می‌شود و به فراورده‌های شکافت اجازه می‌دهد؛ لااقل تا حدی، بدون اینکه تغییر شکلهای زیادی تحمل کنند جایی داشته باشند. بااین‌حال، این خلل و فرج باقی مانده حدودی دارند. از یکسوی کم شدن تعداد اتمهای U در واحد حجم از میزان رآکتیویته می‌کاهد، یا در مقابل، جرم سوخت لازم را افزایش می‌دهد. ازسوی‌دیگر، به‌اصطلاح «داغ‌زدگی» شکافتی، ایجاد گداز موضعی می‌کند یا لااقل نوعی پیوستگی در همجوشی؛ و در نتیجه پاستیلهای $UO_۲$ چگالتر، و سرانجام در غلافهای خود «شناور» خواهند شد. این امر، و نیز آزاد شدن گازهای شکافتی سبب می‌شوند که پایداری گرمایی بین سوخت و غلاف بالا رود. و نیز ممکن است فضاهای بدون سوختی در غلاف پدید آیند که چنان طویل باشند که این مجموعه را از نظر مکانیکی سست کنند و در اطراف خود شارهٔ نوترون را افزایش دهند که آن نیز بنوبهٔ خود موجب داغ‌زدگیهای نامطلوب است.

با این‌همه، اکسید اورانیم با داشتن دقیقاً ترکیب $UO_۲$ اگر بخوبی در همجوش شده باشد ورود تابشها را بدون اینکه ابعاد آن تغییر مزاحمی یابد، تحمل می‌کند. (شبکهٔ بلورین می‌تواند تغییر جزئی در ترکیب خود را تحمل کند؛ اما چون $UO_۲$ بسیار اکسیدشونده است باید مراقبت شود تا بیش از مقدار لازم اکسیژن به خود نگیرد. نرخ احتراق، معمولاً با $UO_۲$ در همجوش، ۲۵۰۰۰MWJ/t در رآکتورهای با آب به‌دست می‌آید و با مخلوط $PuO_۲$ و $UO_۲$ در رآکتورهای با نوترونهای سریع مقدار MWj/t از ۱۰۰۰۰۰ (بیش از ۱۰٪ شکافت) هم می‌گذرد.

در اثر دمای بالای نیروگاهها و تابشها، $UO_۲$ متبلور می‌شود. احتمال می‌رود که یک خلأ محوری هم پدید آید. تَرکها و خللهایی ایجاد می‌شوند و گرما رسانایی کاهش می‌یابد. اما مدادهای غلاف‌دار $UO_۲$ کاملاً سالم باقی‌می‌مانند. گازهای شکافتی در حجم مرده‌ای که برای آنها در نظر گرفته شده بود جای می‌گیرند و با وجود حضور آنها، کار پر کردن با هلیم تحت فشار، تبادل گرمایی خوبی را با غلافها حفظ خواهد کرد. برای سوختهایی که نرخ احتراق بسیار بالایی ($۱۰^۵$MWJ/t) از آنها انتظار می‌رود مدلهایی در نظر گرفته و آزمایش نیز شده‌اند که به گازهای شکافتی، امکان فرار پیوسته را می‌دهند. در چنین شرایطی از مزایای پرکردن با هلیم بی‌بهره می‌مانند و حضور گازهای رادیوآکتیو در رآکتور ناگزیر می‌شود.

بدین‌ترتیب، سوختهای از نوع $UO_۲$ تقریباً در همه نوع رآکتور صنعتی ـ جز رآکتورهای با گرافیت و اورانیم طبیعی، که در آنها چگالی کم $UO_۲$ امکان کاربرد آنها را به‌علت بحرانی بودن در

دمای بالا منتفی می‌سازد ـ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای سرمتهایی (UO_2 بسیار غنی که در زمینه‌ای از آلومینیم یا فولاد پراکنده است) که در برخی رآکتورهای پژوهشی یا مورتورهای کشتی به‌کار رفته‌اند در عمل هیچ مشکلی دیده نشده است.

همهٔ آنچه گفته آمد در مورد سوختهایی که از PuO_2 در همجوش یا مخلوط PuO_2 ـ UO_2 تشکیل شده‌اند و نیز برای عناصر بارآور با مبنای ThO_2 صادق است.

کاربرد کربید: پایداری زیر تابش کربید UC از پایداری اکسید آن هم بهتر است و این وضع تابش بسیار قوی را ممکن می‌سازد. اما این سوخت، که فراوردهٔ گرانی است و دربرابر آب، راکتیو می‌باشد در رآکتورهای با آب قابل استفاده نیست. این سوخت به احتمال زیاد در رآکتورهای با نوترونهای سریع و رآکتورهای دارای دمای بسیار بالا کاربرد دارد. سوختهای مذاب از جنبهٔ بزرگی یا استحکام مکانیکی مشکلی ندارند. خرابی شیمیایی آنها در اثر تابش، کم است و در صورت نیاز آنها را می‌توان بیرون از رآکتور پیوسته به حالت نخست درآورد.

استحکام مواد غلافی: مواد سازندهٔ غلاف طبیعتاً تحت تأثیر ضربات نوترونها قرار می‌گیرند و نیز مستعد گیراندازی نوترون، در بازگشت همراه با تابش γ هستند. آنها همچنین در معرض برخورد با تکه‌های شکافتی فراری از سطح سوخت، می‌باشند. رویهمرفته، زیانهای وارد بر آنها بسیار کمتر از آن است که سوختها متحمل می‌شوند، در مدتی که در رآکتورهای با نوترونهایی گرمایی هستند نه از شکل می‌افتند و نه استحکام مکانیکی آنها کم می‌شود. اما در رآکتورهای با نوترونهای سریع، غلافهای عناصر سوختی متحمل شاریدگی (Fluence) بسیار زیادتر از رآکتورهای گرمایی می‌شوند و نوترونهایی که با آنها برخورد می‌کنند بیشتر هستند و میانگین انرژی آنها آشکارا بالاتر است. به‌دنبال از شکل افتادن، شبکه بلور در اثر برخورد نوترونهای سریع، تأثیر واکنشهای هسته‌ای (n,p) و (n,α) بدان اضافه می‌شود، واکنشهایی که معلول نوترونهایی است که انرژی آنها فراتر از آستانه واکنش‌های مورد نظر است. در نتیجهٔ این واکنشها اتمهای H و He پدید می‌آیند، این اتمها، پخش و به‌شکل گلوله‌های گازی جمع می‌شوند. این گلوله‌ها در اثر نفوذ تهیجاهایی که به‌دنبال جابه‌جایی اتمها در شبکه ـ در اثر برخورد نوترونها ـ پدید آمده‌اند، بزرگ شده‌اند. نتیجهٔ این واکنشها همانا تورم و شکننده شدن فلز است. این پدیده‌های پیچیده، که هنوز کاملاً شناخته نشده‌اند به نوع و حالت فلز و نیز دمای کار وابسته می‌باشند. مثلاً در مورد فولادهای زنگ‌ناپذیر، مقدار تورم در پایینتر از ۳۵۰ و بالاتر از ۸۰۰ درجه، صفر است درحالی‌که در دماهای کار رآکتورها (۵۰۰ تا

۶۰۰ درجه) حداکثر. مقدار تورم همراه با شاریدگی، شتاب می‌گیرد و در مرز حدود ۱۲٪ توقف می‌کند. مقدار تورم در شاریدگیهای متناسب با مدت طبیعی اقامت سوخت در رآکتور ممکن است به ۷ تا ۸٪ برسد. چنین می‌نماید که با روشهایی از فلزگری مبتنی‌بر افزایش چند عنصر آلیاژی و نیز با عملیات گرما مکانیکی، که بافت ویژه‌ای در فلز ایجاد می‌کند، می‌توان این مشکل جدی را برطرف ساخت.

... و فلزات ظرف رآکتور: همین پدیده‌های بنیادین در فلزاتی که نقش سازندهٔ رآکتور را دارند (مثلاً و پیش از همه، در فلزاتی که ظرف رآکتور از آنها ساخته می‌شوند) ایجاد می‌شوند، اما تظاهرات گوناگون دیگری دارند. در واقع، شارهٔ نوترونی که ظرفهای رآکتور در معرض آن هستند بسیار کمتر از شاره‌ای است که غلافها تحمل می‌کنند و مقدار نوترون سریع آن شاره نیز کمتر است. دمای آن پایینتر و ضخامت زیاد آن، اثرهای اشعهٔ γ را نسبت به اثرهای نوترونها مهمتر می‌سازد. اما این ظرفها باید در طول زندگی رآکتور (سی سال یا بیشتر) به آن خدمت کنند و حال‌آنکه غلافها مدت بسیار کمتری پایدار خواهند بود (و تعویض یک سوخت ناقص آسان است). رویهمرفته مقدار تحمل شاریدگی یک ظرف و یک غلاف می‌بایست در یک ردیف باشند. به‌طورکلی می‌توان گفت که تأثیر تابش، فلز را سخت‌تر و شکننده می‌کند (این صفات را بیشتر به‌معنای متداول آن آورده‌ایم تا جنبهٔ علمی دقیق آنها). بویژه دمای تبدل از گسیختگی شکننده به گسیختگی نرم بالا می‌رود، درحالی‌که تحمل ضربه‌های گرمایی پایین می‌آید. بدین علت، بیم از آن است که چنانچه به‌هنگام وقفه‌های کار رآکتور، یک شوک گرمایی شدید در جنب یک نقص شبکه باشد ظرف درهم شکند.

حساسیت ظرفها در موارد زیر کم می‌شود:
انتخاب نوع بهتر فولاد؛
کاهش زیاد ناخالصیهای شکننده (گوگرد، فسفر)؛
به‌کارگرفتن مفتول خوب برای جوشکاری؛
تاب دادن ظرف پس از ساخته شدن، در دمایی بالاتر از دمای کار؛
بالا نگاه‌داشتن هرچه بیشتر دمای کار.

ظرف را به‌روشهای غیرمخرب، منظماً آزمایش می‌کنند و نیز در رآکتور، پهلوی ظرف، نمونه‌هایی از همان فلز را می‌گذارند و از هر دریچهٔ رآکتور، تعدادی از این نمونه‌ها را بیرون می‌کشند و انواع آزمایشهای رایج را روی آنها به‌عمل می‌آورند.

تأثیر تابش روی گرافیت: گرافیت از میان کندسازهای جامد، از نظر صنعتی از همه مهمتر است گرچه خواص فیزیکی و مکانیکی آن در اثر تابش زیان می‌بینند (رسانایی گرما و برق و نیز حالت کشسانی آن پایین می‌آید). جابه‌جایی اتمها (صدها اتم برای مصرف هر MeV انرژی نوترونی) به تراکم تنشهای تغییر شکل دهنده در جامد می‌انجامد، که بخش مهمی از آن، همین‌که دمای فراوردهٔ تابش دیده به اندازهٔ معینی رسید، یکباره آزاد می‌شود و ازاین‌روی خطر نوعی گرم شدن کنترل‌ناپذیر وجود دارد؛ زیرا مقدار انرژی متراکم در هر گرم به‌آسانی می‌تواند به ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر مقدار گرمای ویژه برسد.

بااین‌حال آزاد شدن انرژی نشان می‌دهد که اتمهای جابه‌جا شده اکثراً مکان ثابتی به‌دست خواهند آورد که لزوماً مکان نخستین آنها نیست. امکان اصلاح خواص مربوط به جابه‌جایی اتمها در نتیجهٔ این وضع کاهش می‌یابد؛ گرچه بکلی از بین نمی‌رود.

بدین‌ترتیب، فهمیده می‌شود که زیانهای مربوط به تابش درگرافیت برای رآکتورهای باگرافیت که در حدود دمای معمولی کار می‌کنند (رآکتورهای اولیهٔ پلوتونیمی که با آب یا هوا خنک می‌شوند، و نیز رآکتورهای اولیهٔ پژوهشی که با هوا خنک می‌شوند) بسیار مهم است (حتی در سال ۱۹۵۷ حادثه آفرید)، درحالی‌که برای رآکتورهای قدرت (رآکتور هسته‌ای زیردریاییها، هواپیماها، کشتیها ـ م) بالاتر از درجه‌ای است که بیشتر نارسایی‌ها را درمان می‌کند اهمیتی ندارد. با این وجود، بعضی آثار آن در دماهای بسیار بالاتر از دمای کار رآکتورها باقی می‌مانند.

این قضیهٔ تغییر اندازه‌هاست. این تغییرات بازتاب تغییر شکل خرده بلورهاست: سطوح هشت وجهی، برای اینکه اتمهای درون شبکه‌ای جایگیر شوند ازیکدیگر جدا می‌شوند، و در خود این سطوح، شبکه واحد بلور، کمی فشرده می‌شود (حدود ده بارکمتر از مقدار افزایش جدایی سطوح ازیکدیگر). بدین‌ترتیب، ناهمسانگردی گرافیت آشکارا در تورم خرده بلورها بازتاب دارد. اما گرافیت هسته‌ای از اینکه کاملاً متبلور شود بسیار دور است. و به‌طورکلی، مانند مورد فلزات، تشعشع دو اثر متقابل دارد: در دماهای کم یا متوسط (کمتر از ۴۰۰ درجه) ترتیب موجود را به‌هم می‌زند و نوعی «تبلورزدایی» می‌کند (حجم افزایش می‌یابد). در دمای بالا (بیشتر از ۶۰۰ درجه) جریان عکس انجام می‌گیرد، زیرا چنانچه تشعشع گرافیتی شدن را تشویق کند: چگالی افزایش می‌یابد و جسم فشرده می‌شود.

میزان این تغییرات نسبی ممکن است به ۱٪ و حتی بیشتر برسد.

بنابراین طرز آکندگی گرافیت، که ساختمان رآکتورها را تشکیل می‌دهند باید طوری باشد که به این تغییرات اندازه‌ها و تغییراتی را که در اثر انبساط گرمایی ایجاد می‌شوند امکان دهد، بدون اینکه از ثبات مجموعه یا ردیف بودن کانالهای مخصوص مانور جهت پر کردن و تخلیهٔ سوختها مایه بگذارد. این شرایط با جابه‌جا کردن بسیار حساب شدهٔ مفتولهای گرافیت، که با خارهایی به یکدیگر اتصال دارند، حاصل می‌شود و حال آنکه مجموعهٔ گرافیتهای کارگذاشته شده را تسمه‌هایی از فولاد فنردار نگاه می‌دارند. کاربرد لفافهایی ازگرافیت ثابت همراه با عناصر سوختی، کار را تسهیل می‌کند. در واقع شارهٔ نوترونهای سریع که در جوار مواد سوختی حداکثر می‌باشد بتدریج که در گرافیت، که کندساز خوبی است، فرو می‌رود کم می‌شود. بنابراین، شدیدترین شوکها را لفافهای ثابت گرافیتی تحمل می‌کنند، اما آنها را می‌توان عوض کرد تا از قطعات تشکیل‌دهندهٔ ساختمان دائمی، به‌طور مؤثری حمایت کنند.

مراحل پیش از رآکتور

منابع و ذخایر اورانیم: اورانیم و توریم، تنها عنصر شکافت‌پذیر یا بارآوری هستند که در طبیعت یافت می‌شوند. کاربردهای متداول آنها اهمیت بسیار کمی دارند. اورانیم در صنعت سرامیک و شیشه‌گری رنگهای زرد و نارنجی ایجاد می‌کند. توریم که اکسید آن (ThO_2) دیرگداز است در گذشته برای توریهای چراغ گاز به‌کار گرفته می‌شد و اکنون برای ساخت کاتالیزورهایی مصرف دارد.

فراوردهٔ تغلیظ شده هر دو عنصر مدتها به‌شکل فراوردهٔ جنبی جمع‌آوری می‌شد. در واقع از کانه‌های غنی از اورانیم و رودیم استخراج می‌کنند که انرژی هسته‌ای آن بی‌مصرف مانده است. در بسیاری از کانه‌های فقیر، اورانیم با کانه‌های دیگری همراه است و بزودی مصرف آنها معلوم شد (مانند فسفاتها، کانیهای طلادار، وانادیمهای آهنی و ...). کانه‌های توریوم محتوی خاکهای کمیاب را برای ساختن بعضی آلیاژهای ویژه و برخی کاتالیزورها و لامپهای فلوئورسان به‌کار می‌گیرند.

کاربرد عمدهٔ توریم در رشتهٔ انرژی هسته‌ای، تنها در آیندهٔ متوسط یا زیاد قابل پیش‌بینی است. بدین‌ترتیب، وضع در خطوط کلی در مورد این عنصر تغییر نکرده است.

اما وضع اورانیم بکلی چیز دیگری است. در واقع استخراج رادیم، که تا زمانی‌که اورانیم هنوز هیچ کاربردی نداشت بسیار گران تمام می‌شد تنها ازکانه‌های غنی (با میانگین چند در صد U)، که نسبتاً کمیاب هستند اقتصادی بود. تنها کانسارهای شناخته شده و استخراج شدهٔ آن پیش از

کشف شکافت اتمی، در بوهم و بعداً در زئیر (کنگوی بلژیک) و مدتی بعد درگریت بر[۱] کانادا بودند. موجودی جهانی اورانیم غنی شده (در سال ۱۹۴۰ کمتر از ۲۰۰۰ تن عنصر U بوده است) که با استخراج شدید آن در کانادا در زمان جنگ جهانی دوم، برای رفع نیازمندیهای صنعت هسته‌ای، که تازه آغاز شده بود، کفایت می‌کرد. در زمان حال، این صنعت در هر سال حدود ۲۰۰۰۰ تن مصرف دارد و پیش‌بینی می‌شود که تا پایان همین سده، مصرف کلی این عنصر از ۲۵۰۰۰۰۰ فراتر رود و حداکثر مصرف سالانه، حدود ۲۰۰۰۰۰ باشد. پس از این سده، تقاضا کاهش خواهد یافت، زیرا رآکتورهای بارآور استفاده از ذخایر U۲۳۸ را که به‌شکل اورانیم فقیر وجود دارد ممکن می‌سازند و پس از آن زمان کاربرد توریم فرا خواهد رسید که به همان فراوانی اورانیم است.

این نیازهای روزافزون و توجه دولتهای مختلف برای یافتن این سوخت اولیهٔ جدید در کشور، تکان بسیار نیرومندی به اکتشافات رگه‌های اورانیم و کاربرد آن داده است.

تحرک شیمیایی اورانیم به پراکندگی فراوان این عنصر انجامیده است. سنگهای آذرین (گرانیت و بازالت) یک در میلیون وزنی اورانیم دارند. آبهای زیرزمینی می‌توانند بخشی از این اورانیم را در خود حل کنند و در شرایط گوناگون آن را در جاهای مختلف رسوب‌دهند. کانیهای اولیه (غنی) که از پشبلند (UO_2 ناخالص) تشکیل شده‌اند و یا ترکیبات مختلط اکسیدی (U و Th، U و Mo یا U و Nb و غیره) نیز تشکیل رگه‌های نازکی می‌دهند یا در قشرهای سنگی به‌شکل توده‌ای از بلورها یافت می‌شوند.

اینان نیز ممکن است در جریان تازه‌ای از آبهای زیرزمینی حل شوند. اورانیم به شکلهای گوناگون (اکسیدهای بالا، کربناتها، فسفاتها، واناداتها و غیره) غالباً همراه با فلزات دیگر از نو نشست می‌کند. این کانیهای «ثانوی» به‌شکل صفحات متبلور با توزیع بلوری وجود دارند یا سنگهای متخلخل را از خود آغشته می‌سازند. آنها را می‌توان همچنین در سنگهای متبلور و نیز در فرماسیونهای ته نشستی یافت.

جست‌وجوی سیستماتیک از پیشرفتهای کلی تکنیک به گستردگی استفاده کرده است: جست‌وجوی از هوا؛ حساسیت و سبکی روزافزون وسایل اندازه‌گیری رادیواکتیویته. ژئوشیمی زمینهای مورد آزمایش میکرو آنالیز و ... به‌دنبال این جست‌وجو، ذخایر متعددی از کانیهای

۱. Great Bear: نواحی اطراف دریاچه‌ای با همین نام در شمال‌غربی کانادا.

نسبتاً فقیر (درصد وزنی U در آنها از ۵×۱۰^{-۴} تا ۵×۱۰^{-۳}) کشف شدند که در سالهای ۱۹۶۴ ـ ۱۹۶۵ به‌طور وسیعی استخراج شدند. قدرتهای هسته‌ای، ذخایری تشکیل دادند و منابعی شناخته شدند اما کندی به راه افتادن صنعت الکتریسیتهٔ هسته‌ای «تاخت به‌سوی اورانیم» را آهسته کرد. اکتشافات یک رگهٔ قابل بهره‌برداری حدود پنج سال طول می‌کشد، درحالی‌که این رگه نیز غالباً بیش از پنج تا ده سال دوام نمی‌یابد زیرا معمولاً در هر مکان مورد بهره‌برداری مقدار U از ۱۰۰۰ تن کمتر است. این وضع مقدار کار لازم برای استخراج و فعال‌سازی معدن را نشان می‌دهد و بر این نکته اشاره می‌کند که بمحض خروج از یک دورهٔ طولانی فروش بد، در کار استخراج اورانیم، این پرسش پیش می‌آید که آیا خطر بحران دیگری در چند قدمی ما نیست؟ خطری که، برعکس، مربوط به کاهش تولید است و قیمتها فوری تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

در جهان غرب (از وضع اتحاد شوروی، چین و کشورهای سوسیالیستی چیزی نمی‌دانیم)، ذخایر اورانیم درحال‌حاضر حدود ۸۰۰۰۰ تن $U_۳O_۸$ (ترکیب رایج این ماده برای فروش، که از کارخانه خارج می‌شود) است. تعیین ذخایر اورانیم براساس مقدار $U_۳O_۸$ استخراج‌شونده با هزینه هر کیلوگرم ۱۸۰ فرانک حساب می‌شود. در این جهت ذخایر شناخته شده در حدود ۱۰۰۰۰۰۰ تن است (که تنها ۵ تا ۱۰٪ آن درکشورهای بازار مشترک اروپایی است). این عدد ممکن است با کشف معادن احتمالی، دو یا سه برابر شود؛ و با افزایش ۵۰٪ قیمت مبنا باز هم دو برابر خواهد شد.

چنانچه این مقدار برای رفع نیازهایی که در بالا از آنها یاد شده است کفایت کند، توزیع اورانیم آن‌طور نیست که بتواند همهٔ مشکلات مربوط به ذخیره‌سازی را بویژه برای اروپای غربی برطرف سازد. مراجعه به منابع در دسترس عموم و عملاً پایان ناپذیری همچون آب دریاها (حدود ۰٫۱ گرم اورانیم در هر مترمکعب) یا سنگهای گرانیت (حدود یک گرم اورانیم در هر تن و نیز همین اندازه توریم) تا مدتها به صرفه نیست. با این‌همه، استفاده از این منابع هم تحت بررسی است گرچه روشهای احتمالی استخراج آنها درحال‌حاضر، از اینکه دقیقاً معین باشند بسیار دور می‌باشند و به مصرف مقدار هنگفتی انرژی نیاز دارند (تلمبه‌زنی، آسیا کردن و ...)؛ وانگهی برخورد اقلیمی آنها نیز زیاد شناخته شده نیست.

استخراج و شکل‌دهی: برای رگه‌هایی که هم‌اکنون مورد استفاده هستند، طریقهٔ استخراج، سپس تغلیظ و آماده‌سازی آنها بسیار جدید است. مقدار حلالیت نیترات اورانیل در چندین حلال آلی باعث می‌شود که کاربرد روشهای جداسازی با جریان مخالف بین حلالهای اختلاط‌ناپذیر و نیز دستگاههایی (ستونهای پر شده از مواد تراوا، جداسازی با اختلاط و ...) که در صنعت شیمی

شناخته شده هستند، آسان شود.

در «تخلیص هسته‌ای» از همین روشها استفاده می‌کند. آماده‌سازی و شکلدهی اورانیم فلزی، اکسید (UO_2) در همجوشیده یا کربید (UC) از سالهای ۱۹۴۵ تا ۱۹۶۰ در متالورژی فلزات کمیاب و سرامیک صنعتی، پیشگام بوده‌اند.

اما باید گفت که همکاری صنعت هسته‌ای با الکترونیک و فضانوردی اکنون تنها در محدوده‌ای است که تکنولوژی مواد جدید و نیز معمولی را به مرز می‌راند. این ادعا همان اندازه که برای ساخت انواع فولادها درست است در مورد گرافیتها، بتونها، گرمابرها، فلزات سازندهٔ غلاف یا (و) ساختمانی نظیر زیرکونیم (و شاید بعدها وانادیم) ـ که تا سی سال پیش لااقل کاربردهای فعلی را نداشتند و تنها در تحقیقات آزمایشگاهی به‌کار می‌رفتند ـ نیز مصداق دارد.

جدا کردن ایزوتوپها: اما علاوه‌بر استخراج پلوتونیم (و عناصر دیگر پس از اورانیم) که ما در مراحل پس از رآکتور با آنها سروکار خواهیم داشت، انرژی هسته‌ای صنعت کاملاً نوینی، ـ صنعت جدا کردن ایزوتوپها ـ را پایه گذارده است. چند گرم نخستین آب سنگین حدود سال ۱۹۳۲ به‌دست آمد و نخستین میلی‌گرمهای U۲۳۵ ناب ده سال پس از آن. اکنون آن گرمها به صدها تن آب سنگین و اورانیم غنی شده با درجات مختلف خلوص بالغ شده‌اند که هر سال، جداسازی می‌شوند؛ بدون اینکه از فراورده‌های نسبتاً کمتر اما مهمی، مانند عنصر بور ۱۰ (کمتر از ۱۰۰ گرم در سال، که در دستگاههای اندازه‌گیری و نیز تنظیم رآکتورهای با آب به‌کار می‌روند)؛ لیتیم ۶ که در رآکتورهای هسته‌ای طبق واکنش $^6Li + ^1_0n \longrightarrow ^4He + ^3H$ به ^3H تبدیل می‌شود، سخن گوییم. ^3H اکنون منحصراً کاربرد جنگی دارد اما شاید بعدها برای تغذیهٔ رآکتورهای گداختی برای واکنش ($^2D + ^3H \longrightarrow ^4He + ^1n$) به‌کار رود. لیتیم ۷ زمانی به‌کار گرفته می‌شود که بخواهند از جذب نوترونی L^6 پرهیز شود و . . .

تجهیزات جداسازی: خود کشف ایزوتوپها بستگی به امکان جدا کردن آنها داشته است، کاری که آقای آستن آن را انجام داد. وی برای این کار در سال ۱۹۲۲ طیف‌نگار جرمی را اختراع کرد. در این دستگاه نخستین نوری یونی، دسته اشعهٔ یونی بر اثر ترکیب از میدانهای الکتریکی و مغناطیسی برحسب جرم خود تفکیک می‌شوند. در دستگاههای کنونی، ردیفی از یونهایی که یک میدان الکتریکی آنها را شتابانیده است تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی یکنواخت و عمود بر جهت انتشار، همچون قوسی از دایره خم می‌شوند (ضمناً این یکی از اصول ساختمان سیکلوترون است). چنانچه همه چیز برابر باشد شعاع این دایره با ریشهٔ دوم جرم متناسب است و شکل مناسب

میدان مغناطیسی، تمرکز یونها را در کانون قوس سبب می‌شود: دسته یونهای خروجی در نقاطی که می‌توان یونهای دارای جرم برابر را گرد آورد، همگرایی می‌یابند.

کار جداسازی در دستگاههای اندازه‌گیری که می‌توانند از دستگاههای نور شناخت الکترومغناطیسی با شکاف زاویه‌ای اندک و چگالی یونی بسیار کم استفاده کنند، تقریباً کامل است. جدا کردن مقادیر قابل توجه ایزوتوپها، برعکس، مستلزم دسته اشعهٔ چگال است تا «بار فضایی» که حامل آن می‌باشند به‌آسانی از تمرکز خارج شود. بدین‌ترتیب، به کاربرد منابع ویژه‌ای هدایت شدند، که مرجحاً پلاسما، که به‌طورکلی خنثی است تولید کنند، نه دسته اشعهٔ یونی به‌معنای دقیق کلمه؛ و در نتیجه لازم آمد که دستگاه را اصلاح کنند. باتریهای جداکنندهٔ الکترومغناطیسی که در زمان جنگ مورد استفاده قرار می‌گرفتند برای جداسازی کامل U۲۳۵ کمی غنی شده به‌کار گرفته می‌شدند. شماری از این دستگاههای جداکننده هنوز برای تولید، به‌مقدار چند گرم در روز، ایزوتوپهای بسیار گوناگون مخصوص کار پژوهشی، فعال می‌باشند. از انعطاف سیستم نیز استفاده شد و با میزان‌سازی میدان مغناطیسی و فاصلهٔ کلکتورها از یکدیگر توانستند از مواد گوناگون استفاده کنند.

جداسازی کامل، اصولاً با یک عمل امکانپذیر است. اما این روش انرژی زیادی، چه در منبع و چه در آهنرباهای برقی، می‌طلبد و با تولید پیوسته سازگار نیست. بنابراین، به‌طور ساده می‌توان گفت که دنبالهٔ کار با اورانیم است.

روش فوتوشیمیایی: فوتوشیمی هم می‌تواند، اساساً برای جداسازی کامل طی یک عمل به‌کار گرفته شود.

تحریک فوتوشیمیایی انتخابی براین‌پایه است که برای حتی یک گونهٔ شیمیایی، بسامدهای جذب تا اندازه‌ای به جرم هسته بستگی دارند. انواع مربوط به بسامد $\Delta\nu/\nu$، برحسب مورد در حدود $\Delta M/M$ یا $\sqrt{\frac{\Delta M}{M}}$ هستند. در محیط گازی کمی متراکم، خطوط طیفی مربوط به انواع ایزوتوپها بخوبی جدا می‌شوند. بنابراین، اگر یک منبع نوری داشته باشیم که بسامد آن با بسامد مولکولهای ایزوتوپی منطبق باشد، این‌گونه تنها نور تابیده را جذب خواهد کرد. اگر این جذب، علاوه‌بر آن به حالتی تحریک شده بیانجامد که آمادهٔ واکنش فوری با واکنش‌گری باشد که با گونهٔ شیمیایی مورد بحث در حالت تحریک ناشده حساسیتی نداشته باشد یک فرایند فوتوشیمیایی مربوط به تنها یک ایزوتوپ خواهیم داشت.

از زمانی‌که لیزرهایی ساخته شد که می‌توانند دسته اشعهٔ شدید و بسیار تک‌فام، با بسامد قابل تنظیم ایجاد کنند می‌توان امید داشت که فوتوشیمی انتخابی روش جالبی برای جداسازی ایزوتوپها داشته باشد (مثلاً، فوتو آکتیواسیون همراه با فوتویونیزاسیون به کمک دو لیزر جدا از هم). بررسیهایی دراین‌باره در چندین آزمایشگاه بشدت دنبال می‌شود، اما این روش، با اینکه عوامل خوشبین‌کننده در آن کم نیست، هنوز تا عمل فاصلهٔ زیادی دارد.

جداسازی آبشاری: همهٔ پدیده‌های فیزیکی (از زمان پیدایش نظریهٔ تحرک مولکولی این امر معلوم شده است) و فیزیکوشیمیایی (از زمانی‌که، در سال ۱۹۲۲، لیندمان[1] نظریهٔ کوانتومی کلاسیک را در ترمودینامیک شیمی به‌کار برد، گرچه تا بیست سال پس از این تاریخ، مفهوم آن بدرستی دانسته نشده بود) وابستهٔ جرم اتمها، یا (و) مولکولها می‌باشند و بر پایهٔ مقدار جرم خود می‌توانند تفکیک شوند. براین‌پایه، دربرابر حرکت آشفتهٔ مولکولها، پدیده‌ای را که اساس آن بر مقدار جرم است قرار می‌دهند. نوعی جداسازی جزئی است که باید تا به‌دست آمدن نتایج دلخواه آن را به‌طور منظم تکرار کرد.

فرض کنیم که A و B اجزای تشکیل‌دهندهٔ یک مخلوط دوتایی باشند. هر مرحله از جداسازی با یک مخلوط ورودی (یا تغذیه)، بخشی از مواد تولید شده و بخشی از مواد ردی و هر یک از دو جزء وارد شده از مرحلهٔ پیش یا مرحلهٔ بعدی سروکار دارد. همانند یک تقطیر جزءبه‌جزء از اصل جداسازی با جریان مخالف، استفاده می‌شود. جزء A در این «فراورده‌ها» وارد می‌شود و جزء B در «مواد ردی» (یا برعکس، برحسب مقدار جرمهای آنها و روش به‌کارگرفته شده). اینک نوبت تعیین است: تعداد «مراحل تغلیظ» که برای به‌دست آوردن A با خلوص مناسب لازم است؛ و تعداد «مراحل رقیق شدن» که برای اینکه مواد ردی نهایی مقدار زیادی از جزء A نداشته باشند. این مجموعه را «آبشار جداساز» اصطلاح کرده‌اند. چنان‌چه مرتبهٔ ردیف n (غلظت، یا برعکس، رقّت) را با علامت $\pm n$ نشان دهیم متوجه می‌شویم که بهتر است مرتبه n را با فراوردهٔ مرتبهٔ $(n - ۱)$ با ماده ردّی مرتبهٔ $(n + ۱)$ تغذیه کنیم و در همان حال ترتیبی بدهیم که این دو مخلوط ترکیب یکسانی داشته باشند ـ اگر چنین نباشد بخشی از جداسازی انجام شده هدر خواهد رفت.

تعداد مراتب N لازم برای رسیدن به درجهٔ معینی از جداسازی، اگر درصد

۱. Lindemann: فریدریک آلگزاندر (۱۸۸۶ـ۱۹۵۷)، فیزیکدان انگلیسی.

اولیه ایزوتوپ مورد نظر، یا ضریبی که کارایی هر مرتبه را نشان می‌دهد کاهش یابد، سرعت بسیار زیاد خواهد شد. با همین روش شمار مراتب کم شدن $\acute{N}$ تعیین می‌شود.

متوجه می‌شویم که این سیستم، همواره محتوی مقداری از جسم است (هر قدر ضریب مشخص‌کننده هر مرتبه کم باشد مقدار جسم زیادتر است) که در یک شارهٔ «بالا رونده» غلظت و یک شارهٔ «پایین آینده» تخلیه بخش شده است. چنانچه مقدار این صعود و نزول را نداشته باشیم این شاره‌ها تسهیم غلظتها را تأمین می‌کنند. با شباهتی که کار تقطیر با جداسازی دارد می‌توان حالت یک ستون تقطیر دارای باز روانی کلی و بدون تولید را تصور کرد. برای اینکه تولید داشته باشیم باید بر شارهٔ دایمی یک شارهٔ تولید تحمیل کرد تا توزیع غلظتها در تمام طول آبشار تغییر کند: کارایی جداسازی با برداشت کاهش می‌یابد.

با این‌همه، مفید است که شارهٔ تولید نسبت به شارهٔ کلی هرچه بزرگتر باشد، زیرا برای مقدار معینی تولید، حجم تجهیزات (بنابراین بهای تولید)، انرژی لازم برای به گردش درآوردن همه فراورده‌های مربوطه، و نیز زمان ضرور برای راه‌انداختن این فرایند در آغاز کار یا پس از وقفه‌ای که ناشی از حادثه‌ای است (بنابراین هزینهٔ تولید)، با کم شدن شارهٔ کل، پایین می‌آیند. ثابت شده است که بهترین روش این است که شاره از هر مرتبه به مرتبهٔ بعدی، متناسب با دور شدن از مخلوط اولیه، کاهش یابد.

بدین‌ترتیب، زمانی‌که جداسازی مورد نظر تنها به چند طبقه نیاز دارد، مثلاً در بیشتر جداسازیهای شیمیایی که کارایی هر طبقه زیاد است، از «آبشار ایده‌آل» کاملاً صرفنظر می‌شود. در حالت معکوس که بویژه مربوط به جداسازیهایی ایزوتوپی است، طبقه‌ها را در تعدادی از سریها مجتمع می‌سازند و در هر سری، هر طبقه می‌تواند از واحدهای یکسانی که به‌شکل موازی روی یکدیگر قرار دارند تشکیل شده باشد و هرگاه شمارهٔ ردیف طبقه بالا می‌رود تعداد آن پایین می‌آید. در چنین حالتی کار بهینه‌سازی بسیار دشوار است اما اشکال اساسی ندارد.

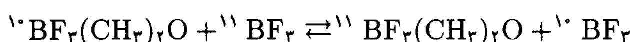
در پایان باید گفت که طبقه‌ها را می‌توان با دستگاههای معینی تجسم داد (دستگاههای جداسازی با اختلاط برای جداسازیهای با حلال؛ ستونهای بشقابکدار برای تقطیرهای جزء‌به‌جزء؛ دستگاههای مرکزگریز سریع یا دستگاههای دیفوزیون (نفوذیابی) برای جزء‌به‌جزء کردن ایزوتوپی UF_6). اما آنها را می‌توان همچنین به قسمت معینی از یک دستگاه حواله داد، مثلاً یک ستون

از تقطیر یا جداسازی مایع ـ مایع که شارهٔ بالارونده و پایین آینده، با نوعی پر کردن ویژه با یکدیگر آمیزش می‌یابند.

زمانی‌که آمیزه‌های جدا کردنی از گونه‌های شیمیایی مختلفی هستند کوشش می‌شود که لااقل یکی از این گونه‌ها حتی‌المقدور به‌طور کامل با خلوص زیاد به‌دست آید. کار جزء‌به‌جزء کردن این گونه‌ها بر پایهٔ تفاوت حلالیت، ثابت تعادل واکنش با یک واکنشگر (مثلاً یک تبادلگر یونی)، ضریب تسهیم بین دو حلال و ... انجام می‌گیرد. تنها در زمانی‌که با دو مادهٔ با خواص کاملاً نزدیک به‌هم سروکار داریم (مثلاً خاکهای کمیاب) راه بسیار آسان این است که درپی سیستمی برآییم که با آسانی فراوان جداسازی تقریباً کامل را ممکن سازد.

در جداسازی ایزوتوپی، کارایی در هر طبقه بسیار کم است؛ درحالی‌که غالباً می‌توان به یک جداسازی جزء‌به‌جزء رضایت داد و هزینهٔ این کار از مادهٔ خام چنان بالاتر است که در بهترین شرایط، غالباً تنها بخشی از مقدار کل ایزوتوپ مورد نظر موجود در مادهٔ خام به‌دست می‌آید.

مورد بور: جداسازی ایزوتوپهای بور (^{10}B و ^{11}B که فراوانی آنها در طبیعت به ترتیب: ۱۸٫۸۳ و ۸۱٫۱۷ است) بر پایهٔ BF_3 که در دمای معمولی گازی است، قرار دارد. آن را در اتر $(CH_3)_2O$ حل می‌کنند تا یک ترکیب افزایشی $BF_3(CH_3)_2O$ به‌دست آید که به‌هنگام تبخیر، تفکیک می‌شود. تقطیر جزء‌به‌جزء این محلول با نوعی تقطیر با واکنش دقیقاً تبادلی همراه است:



$$^{10}BF_3(CH_3)_2O + ^{11}BF_3 \rightleftarrows ^{11}BF_3(CH_3)_2O + ^{10}BF_3$$

هر دو فرایند میل به غنی کردن حالت گازی با ^{10}B دارند. این، نوعی جداسازی نسبتاً آسان است: ضریب کارایی، خیلی پایین نیست و درصد اولیهٔ ^{10}B بقدر کافی بالا است. لزوم پرهیز از هر ذرهٔ آب (زیرا BF_3 بسرعت هیدرولیز می‌شود) و نیز عمل کردن در فشار چند اتمسفر، مسائلی هستند که با روشهای بسیار معمولی مهندسی شیمی حل می‌شوند.

... لیتیم: لیتیم طبیعی دارای ایزوتوپهای ^{6}Li و ^{7}Li با درصد ۷٫۴ و ۹۲٫۶ است. تولید ^{3}H در عمل، در سال به چندین تن ^{6}Li نیاز دارد. چون تولید این ماده بیش از هرچیز، جنگی است روشهای تولید آن در پرده‌ای از پنهانکاری پوشیده شده است. شکی نیست که از واکنش تبادلی بین محلولی که محتوی نمکی از لیتیم است و یک تبادلگر یونی یا ملغمهٔ لیتیم استفاده می‌شود. در مورد اخیر، نمک لیتیم در حلالی آلی حل می‌شود، زیرا واکنش ملغمه با آب بسیار سریعتر از واکنش تبادلی است

... آب سنگین: در استفاده از آب سنگین، دشواری کار قبل از هر چیز، کمی عنصر دوتریوم در طبیعت (یک اتم دوتریوم در هر ۶۴۰۰ اتم هیدوژن)، و لزوم رسیدن به خلوص بسیار زیاد ایزوتوپی است، زیرا ایزوتوپ H نوترونها را ۷۰۰ بار بیشتر از ایزوتوپ D گیرمی‌اندازد. اما، باید ضریب کارایی بالا باشد زیرا جرم Dدو برابر جرم H است و ضریب کارایی تابع دور شدن از جرمهاست، $\Delta M/M$

سه روش به‌کار رفته است که غالباً همراه با یکدیگر می‌باشند و تفاوت اساسی با هم ندارند:

- تقطیر آب، هیدروژن یا آمونیاک مایع؛
- الکترولیز محلولهای قلیایی؛
- تبادل شیمیایی.

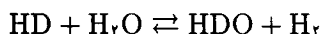
الکترولیز، نخستین تکنیکی بود که در این راه به‌کار گرفته شد؛ درحال‌حاضر با اینکه بکلی حذف نشده، اما از رده خارج است.

در الکترولیز یک محلول آبی، هیدروژنی که تشکیل می‌شود آشکارا از D فقیر می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که D در محلول تمرکز یافته است. ضریب جداسازی، که تابعی از دما، نوع الکترود و چگالی جریان برق است، بزرگ می‌باشد. بنابراین، می‌توان در یک باتری الکترولیز، اجتماع ظرفها و گردش الکترولیت را تأمین کرد (بدون فراموش کردن تراکم بخار آبی که با آزاد شدن هیدروژن آزاد می‌شود!)؛ به‌طوری‌که آبشاری به‌وجود آید تا این محلول بتدریج از D_2O غنی شود (پنج طبقه کافی است). نوعی پیچیدگی که در همهٔ مواردی که از مولکولهای دارای بیش از یک اتم H استفاده می‌شود، وجود دارد برخاسته از این واقعیت است که نه‌تنها باید مولکولهای H_2O، D_2O، H_2 و D_2 را در نظر گرفت بلکه HDO و HD نیز در کار هستند. آشکارا بازروانی مطرح نیست جز اینکه هیدروژن لااقل همین‌که مقدار D آن به غلظت طبیعی رسید از نو می‌سوزد (اما کارخانه‌های الکترولیز به‌طورکلی هدف اصلیشان تولید هیدروژن است)، یا ترکیب الکترولیز با نوعی واکنش تبادلی بین H_2 و H_2O یا NH_3 است؛ که دراین‌صورت صرفنظرکردن از الکترولیز بسیار با صرفه است.

برای تقطیر H_2 مایع، آبشار چهار طبقه‌ای، خلوص مطلوب را به‌دست می‌دهد. دشواری اصلی، لزوم دمای بسیار پایین است. وانگهی واکنش تبادلی $HD + HD \rightleftarrows H_2 + D_2$ حتی در مجاورت کاتالیزورها کند است، واقعیتی که سبب پیچیدگی تجهیزات می‌شود. مصرف برق برای D_2O چند کیلووات ساعت برای هر گرم است. واحدهای آزمایشی چند تنی در سال، بخوبی کار کرده‌اند اما سرانجام این روش کنار گذاشته شد.

چنین می‌نماید که تقطیر NH_3 مایع نسبت به آب برتری ندارد. در ممالک متحدهٔ امریکا در زمان جنگ برای تولید صدها تن آب سنگین اولیه، از تقطیر آب استفاده می‌شد و اینک تنها برای تغلیظ نهایی یا برای تغلیظ دوبارهٔ آبهای سنگینی که در جریان کاربردشان، کمی آلودهٔ آب معمولی شده‌اند، به‌کار می‌رود (از این تجربه برای به‌دست آوردن آب غنی از ^{18}O مورد نیاز آزمایشگاهها استفاده شد).

از سه واکنش تبادلی مورد استفاده، دو واکنش از آنها هیدروژن را به‌کار می‌برند:

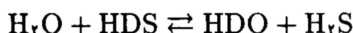


$$HD + H_2O \rightleftarrows HDO + H_2$$



$$HD + NH_3 \rightleftarrows NH_2D + H_2$$

هر دو واکنش نیاز به کاتالیزور دارند. اما واکنش تبادلی (H_2 و NH_3) پتاسیم آمید NH_2K محلول در آمونیاک مایع است. برعکس، تبادل (H_2 و H_2O) نیاز به یک کاتالیزور جامد دارد (که بر پایهٔ نیکل یا پلاتین باشد) که فقط در نبودن آب مایع فعال است. بدین‌ترتیب، برای واکنش تبادلی (H_2 و NH_3) دو مزیت (بهترین ضریب کارایی در هر طبقه، کاتالیزور محلول) دیده می‌شود. هر دو ماده در مقیاس صنعتی ساخته می‌شوند (حدود ۱۰۰ تن در سال برای اولی و ۲۰ تن در سال برای دیگری) با صرف انرژی حدود یک کیلووات در ساعت برای هر گرم D_2O. اما هنوز این روش از روش سوم، که نیازی به کاتالیزور ندارد، پیشی نگرفته است:



$$H_2O + HDS \rightleftarrows HDO + H_2S$$

این تبادل را در سیستمی «دوآتشه» به‌کار می‌برند. در طبقهٔ n در دمای $30\,^\circ C$ ترکیب HDS مقداری از D خود را به آب وا می‌گذارد. مقداری از این آب به بخش سرد طبقه $n+1$ می‌رود و بقیهٔ آن مقداری از D را در بخش گرم همان طبقهٔ n به H_2S می‌دهد. ترکیب H_2S از این بخش به بخش سرد n رانده

۱۲۳ ناعوره دوتریوم ایجاد می‌شود، درحالی‌که

برابر $30^\circ C$ و در بالا به علل خورندگی و مصرف دما $130^\circ C$ درجه است. برای اینکه آب حالت مایع خود را از دست ندهد و غلظت کافی از H_2S تأمین باشد کار را در فشار معتدلی انجام می‌دهند. نوعی آبشار طبقه‌های دوگانه، آب را تا حدود ۱۵٪ از D_2O غنی می‌کند و در پایان آن را تقطیر می‌کنند.

جداسازی ایزوتوپهای اورانیم: روش کار در مورد اورانیم بکلی تفاوت دارد. تفاوت نسبی جرمهای دو ایزوتوپ مهم (۱۲۶٫۰ = ۳/۲۳۸) چنان کم است که هیچ‌یک از تبادلهای گوناگون شیمیایی آزمایش شده هیچ مقدار عملی از کارایی طبقه به ما نمی‌دهند. تنها ترکیب تبخیرشونده و پایدار آن UF_6 پیش از ذوب شدن تصعید می‌شود. بنابراین، تقطیر جزبه‌جزء آن عملی نیست. ازاین‌رو، به روشهای فیزیکی بسنده می‌کنند که تنها دیفوزیون گازی آن در سال ۱۹۴۴ گسترش مهمی در صنعت یافت. روش دیگری که مرکز گریزی سریع گازی است چنین می‌نماید که در آینده نزدیکی رقیب روش نخست شود، روش سوم که گذرانیدن جهشی گازی با سرعت مافوق صوت از میان یک زنبورک خمیده است (از مرکز گریزی با جدار ثابت سخن می‌رود) در تأسیسات آزمایشی به موفقیت نزدیک می‌شود.

دیفوزیون گازی: دیفوزیون گازی (که دقیقتر است آن را نفوذ مولکولی بنامیم) عبارت است از راندن UF_6 از روزنه‌های بسیار تنگ یک جدار ظریف.

تعداد برخوردهای مولکولها گازی با جرم مولکولی M با سطح معینی از جدار در واحد زمان متناسب است با $1/\sqrt{M}$. در مخلوطی از جرمهای مولی M و M' ($M' < M$)، سازای سبکتر، بیش از دیگری با روزنه برخورد دارد و در رابطهٔ $\sqrt{M/M'}$ سریع‌تر نفوذ می‌کند و ضریب جداسازی سرشتی آن عبارت است از: $\alpha = \sqrt{M/M'}$ که برای UF_6 مقدار $\alpha = 1{,}0043$ است.

در یک میدان گرانشی، ترکیب یک مخلوط گازی آرام و با دمای ثابت، برحسب ارتفاع تغییر می‌کند و سنگینترین جزء سازنده در پایین جمع می‌شود و عامل تعیین‌کننده، رابطهٔ انرژی پتانسیل Mgh (g شتاب سقوط و h ارتفاع) به انرژی اغتشاش گرمایی RT (T دمای مطلق و R ثابت گازهای ایده‌آل) است. بنابراین ترکیب اتمسفر تغییر نمی‌کند، اما این ترکیب نه دمای ثابت دارد و نه آرام است.

چنانچهٔ گاز درون استوانه‌ای با شعاع r باشد که با سرعت زاویه‌ای ω می‌گردد

با وضع مشابهی روبه‌رو هستیم. در هر بخش راست استوانه (در غیاب جریانهای همرفتی (کنوکسیونی)، هر مولکول با جرم m در نوعی میدان نیروی شعاعی است که شدت آن در فاصلهٔ x از محور برابر $m\omega^۲x$ است که شیب یک انرژی پتانسیل $m\omega^۲x^۲/۲$ است. بر همین اساس (قسمت پایین اتمسفر که مربوط به بیرون استوانه است)، غلظتهای N درکنار و N° روی محور استوانه، مربوط به‌یک ضریب جداسازی خواهند شد:

$$\alpha = ۱ + \frac{M - M'}{2RT}\omega^۲r^۲$$

دیده می‌شود که $(\alpha - ۱)$ با $(M - M')$ متناسب است، درحالی‌که در مورد دیفوزیون:

$$\alpha = \sqrt{M/M'} = \sqrt{۱ + \frac{M - M'}{M'}} = ۱ + \frac{M - M'}{2M'}$$

چنانچه بتوان دستگاههایی نظیر $\frac{\omega^۲r^۲}{RT} > \frac{۱}{M'}$ را به تصور آورد مرکزگریزی اساساً بر دیفوزیون برتری دارد. اگر ωr بسرعت صوت برسد یعنی $۳ \times ۱۰^۴ cm^{-۱}$ آن‌گاه $\alpha = ۱/۰۵۴$ خواهد بود و بنابراین $\alpha - ۱ = ۰/۰۵۴$ ده برابر بزرگتر از پارامتر دیفوزیون (۰/۰۰۴۳) است. چیزی که می‌ماند مقایسه روشها و هزینهٔ عملکرد آنهاست.

این طرحها را می‌توان به کمک مفاهیم قدرت جداسازی و کار جداسازی مشخص ساخت (کاربرد این اصطلاحها در زبان متداول صنعت هسته‌ای قابل سرزنش است، زیرا آنها تنها دلالت بر مقادیری دارند که در فیزیک نیز با همین نام خوانده می‌شوند).

با فرض اینکه تابعی به‌شکل $V(x)$ به‌نام تابع مقدار وجود دارد که حاصلضرب آن در مقدار خروجی، قدرت جداسازی تعریف می‌شود می‌توان یک طبقهٔ جداسازی را مشخص کرد. مقدار V برای یک طبقه n عبارت است از:

$$\Delta_n = P_nV(x_p) + R_nV(x_n) - E_nV(x_e)$$

ثابت می‌شود که (اگر x کسر مولی در ایزوتوپ کمیاب باشد):

$$V(x) = (۲x - ۱)\ln\frac{x}{۱ - x}$$

چنانچه به شرایط حدی رضایت دهند

$$V(۰/۵) = V'(۰/۵) = ۰$$

برای به‌اصطلاح آبشار کامل با خروجیهای مربوط به ورودی E، تولید P و ردی R داریم:

$$E = P + R$$

$$Ex_{۰} = Px_P + Rx_R$$

$$\Delta = PV(x_p) + RV(x_R) - EV(x_{۰})$$

Δ ابعاد خروجی را دارد (مقدار آن در واحد زمان است و بنابراین نامگذاری نامناسب قدرت). حاصلضرب آن در زمان (بنابراین نام‌کار: قدرت × زمان) واحدی از جسم خواهد بود (موفقیت ناراحت‌کننده‌ای که یک «کار جداسازی» برحسب کیلوگرم اندازه‌گرفته می‌شود!).

بدین‌ترتیب به مشخص کردن ظرفیت یک کارخانه برحسب «تن کار جداسازی در سال» رسیدند (به‌طور روزافزونی گفته می‌شود: واحد کار جداسازی یا UTS).

Δ تنها تابع مقادیر ورودی، ردی و تولید است؛ بنابراین مقادیر x و خروجیها، نه به‌روش جداسازی بستگی دارد و نه به طرز عملی کردن این روش.

در به‌اصطلاح یک آبشار ایده‌آل که خروجی در هر مرتبه بهینه است ثابت می‌شود که خروجی کل برابر است با

$$\Delta / \left(\frac{\alpha - ۱}{۲}\right)^{۲}$$

این خروجی کل و بنابراین انرژی لازم برای انجام آن، با کم شدن α سریعاً افزایش می‌یابد.

در یک آبشار واقعی همهٔ این مراتب به‌طور کیفی صحیح هستند، گرچه کمتر از آبشار ایده‌آل سود بخش می‌باشند. هزینهٔ این کار برحسب کیلوگرم ایزوتوپ خالص (یا مخلوط غنی‌شده) C_P شامل بهای مادهٔ خام و هزینه غنی‌سازی است

$$C_p = C_E E + C_\Delta \Delta - C_R(E - ۱)$$

این بهای اورانیم طبیعی (به‌شکل UF_6) برحسب کیلوگرم است. مقدار E، تعداد کیلوگرم اورانیم طبیعی است که برای به‌دست آوردن یک کیلوگرم فراوردهٔ مورد نظر لازم می‌باشد. مقدار C_R تعداد کیلوگرم مخلوط ردی (عملاً صفر) است. مقدار C_Δ هزینهٔ واحد کار جداسازی است که بستگی شدید به‌طرز کار دارد؛ بالاخره باید گفت که Δ تعداد واحد «کار جداسازی» لازم برای تهیهٔ یک کیلوگرم فراورده است.

کارخانهٔ دیفوزیون: بخشهای اساسی کارخانهٔ دیفوزیون عبارتنداز:

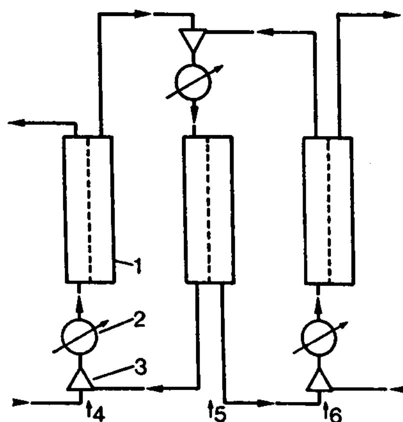
- پوشش نفوذناپذیر، که یک غشای تراوا آن را به دو قسمت می‌کند و UF_6 گازی از میان آن می‌گذرد؛
- کمپرسوری که گازی را که از غشاء تراوش می‌کند می‌مکد و پس از عبور دادن از یک تبادل‌کنندهٔ گرمایی، که گرمای تراکم را می‌گیرد، آن را به درون واحد بعدی می‌راند.
- کمپرسور دیگری که گازهای مانده را می‌گیرد و آن را، سرد شده، از نوبه واحد پیشین تزریق می‌کند. تعداد مورد نظر واحدهای موازی، یک طبقه را تشکیل می‌دهند و سری طبقات، یک آبشار را (شکلهای ۱۲۲ و ۱۲۳).

همان‌طورکه گفته‌ایم ابعاد و عدهٔ واحدها را طوری معین می‌کنند که آبشار واقعی، تفاوت چندانی با آبشار ایده‌آل نداشته باشد (شکل ۱۲۴).

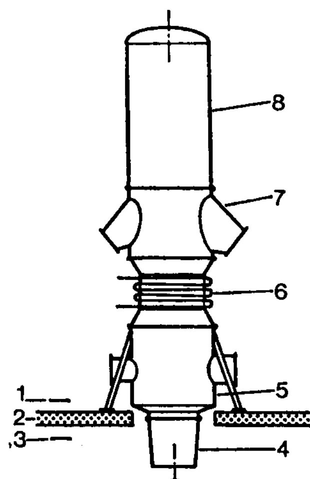
همهٔ کارخانه را باید در دمایی نگاه‌داشت که در هیچ بخشی UF_6 جامد ایجاد نشود. تنها موادی که می‌توانند با UF_6 تماس داشته باشند نیکل، آلومینیم، مس و آلیاژهایی از فولاد و نیز تعدادی سرامیک می‌باشند. ذرات آب هم باید حذف شوند زیرا تشکیل HF بسیار خورنده و اکسی‌فلوئورید اورانیم جامد می‌دهند که ممکن است خلل و فرج غشاها را ببندند. روغنها و گریسهای معمولی محتوی هیدروژن نیز زیان‌آور می‌باشند و به‌جای آنها از فلوئور و کربنها استفاده می‌شود. صنعت هسته‌ای پایگاه انواع فرئون و تفلون، که کاربردهای زیادی دارند، نیز بوده است.

سمّیت UF_6 بیش از هرچیز ناشی از هیدرولیز است و لزوم پرهیز از کمترین مقدار نشت اورانیم، بویژه غنی شده از ۲۳۵، مستلزم نفوذ ناپذیری تقریباً مطلق است و هرکجا که احتمال نشت می‌رود (مثلاً گذرگاههای محورها)، برای بازیابی UF_6 باید تمهیداتی در نظر گرفته شود.

همین‌که UF_6 به‌طور محسوسی از اورانیم ۲۳۵ غنی شد ممکن است شرایط بحرانی پدید آید. در طرح واحدها و هندسهٔ منضمات آنها باید این خطر در نظرگرفته شود و درعین‌حال ضروری



شکل۱۲۲.نمایهٔ یک آبشار برای جداسازی ایزوتوپهای اورانیم با دیفوزیون UF_6.
آرایش سه طبقهٔ پیاپی؛ ۱. دستگاه دیفوزیون که یک غشای تراوا (خطهای گسسته) آن را به دو بخش کرده است، ۲. تبادلگری که گرمای تراکم را از بین می‌برد؛۳. کمپرسور؛۴. طبقهٔ ردیف $n - ۱$؛ ۵، طبقهٔ ردیف n؛ ۶، طبقهٔ ردیف $n + ۱$.

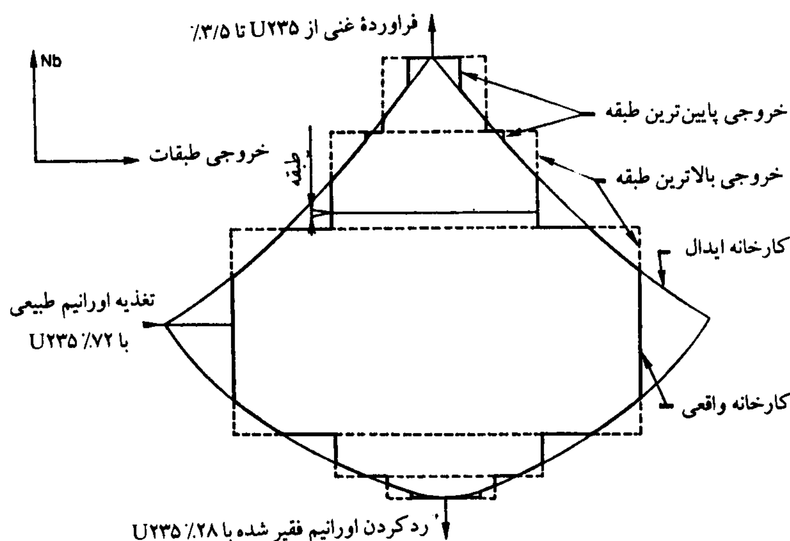


شکل۱۲۳.نمایهٔ عمودی یک دستگاه دیفوزیون.
۱.محل دستگاههای دیفوزیون؛ ۲. سکوی حامل؛ ۳. منطقهٔ بدون اورانیم؛ ۴. موتور برق؛ ۵. قطعهٔ محتوی کمپرسور؛ ۶. تبادلگر گرما؛ ۷. قطعهٔ میانی و اتصالات؛ ۸. دستگاه دیفوزیون.

است که از ایجاد حجمهای مرده بین بخشهای دیفوزیون پرهیز کرد.

برای اینکه غشاءها به‌طور مؤثری کار کنند باید شرایط گوناگونی حکمفرما باشد: ترکیب UF_6 در آنها ایجاد خوردگی نکند؛ از جنبهٔ مکانیکی بسیار مستحکم باشند؛ نفوذپذیری خوبی داشته باشند؛ خلل و فرج آنها متناسب با کار جداسازی از راه نفوذ باشد.

خلل و فرج غشاء، ناگزیر بزرگتر و بویژه ضخیمتر از ابعاد مولکولها هستند. چنانچه ابعاد یک روزنه از مساحت آزاد میانگین مولکولها درگاز بالاکوچکتر باشد مولکولهایی که وارد می‌شوند عملاً در آنجا یک به یک درگیر خواهند شد و در مسیر خود از یکدیگر بی‌خبر خواهند بود. مولکولهای سبکتر بیشتر تردد دارند، سریعتر می‌گذرند و روزنه، کار جداسازی خود را انجام می‌دهد. چنانچه بزرگی روزنه از مسافت آزاد میانگین مولکولهای واردشونده بسیار بزرگتر باشد این مولکولها به یکدیگر تنه می‌زنند و بی‌نظمی پدید می‌آید: در نهایت، روزنهٔ بسیار بزرگ را می‌توان سوراخ نامید و



شکل ۱۲۴.نمایهٔ یک کارخانهٔ دیفوزیون برای تولید اورانیم غنی مناسب رآکتورهای با آب. ابعاد افقی، متناسب با خروجی طبقه است و ابعاد عمودی، متناسب با تعداد طبقه‌ها.

هیچ‌گونه جداسازی را انجام نمی‌دهد.

بنابراین، باید روزنه‌ها به‌حد کافی یکسان و از مسافت آزاد میانگین کوچکتر باشند. از روزنه‌های بزرگ باید پرهیز کرد زیرا موج گازی وارد شده در آنجا بلعیده می‌شود و مقدار کمتری را با دشواری زیادتر رقیق می‌سازد درحالی‌که از روزنه‌های کوچک با کارایی بیشتری می‌گذرد.

گرچه جداسازی ایزوتوپهای اورانیم از طریق دیفوزیون در پنج کشور در مقیاس صنعتی انجام می‌گیرد، تکنولوژی ساخت غشاءهای تراوا هنوز سری است. تصور می‌شود که برای ساخت این غشاءها از نیکل در همجوش یا سرامیک (Al_2O_3) در همجوش استفاده می‌شود. کاربرد دانه‌های بسیار کوچک امکان می‌دهد که روزنه‌های بسیار کوچک، در حدود ۲۰۰ آنگستروم یا 2×10^{-8} متر به‌دست آید که تعداد آنها در واحد سطح برای تأمین محصولی درخور کافی است. غشاءهای لوله‌ای طی سالها کاربرد، رضایت‌بخش بوده‌اند.

ضریب جداسازی $\alpha = \sqrt{M/M'}$ برای UF_6 برابر ۰٫۰۰۴۳ است؛ که

ماگزیمم نظری برای غشاء کاملی است که با گازی دارای ترکیب ثابت تغذیه شده است، درحالی‌که گاز مرحلهٔ قبلی بیدرنگ دور شده است.

بنابراین، گازی که وارد می‌شود طول کم‌وبیش زیادی از این غشاء را درمی‌نوردد و در این جریان از ایزوتوپ ۲۳۵ به تناسب فقیر می‌شود. نمی‌توان برای صرفه‌جویی کردن در قدرت پمپاژ و کاهش کارهای مکانیکی، در مرحلهٔ قبلی خلأ شدیدی ایجاد کرد. بدین‌ترتیب، نوعی دیفوزیون به پس، از مرحله قبلی به بعدی وجود دارد که تأثیر جداسازی را کم خواهدکرد. این غشاءها کامل نیستند. با در نظر گرفتن همهٔ عوامل، ضریب جداسازی مؤثر، ۱٫۰۰۲ خواهد بود.

با مقدار بالا و بخش مولی نخستین ۲۳۵، مقدار $x_\circ$ برابر $۷٫۲ \times ۱۰^{-۳}$ می‌باشد و آبشار ایده‌آل، اگر $x_P = ۰٫۹۰$ (اورانیم برای انفجار) باشد ۳۵۷۰ طبقه خواهد داشت، و اگر $x_P = ۰٫۰۴$ (سوخت برای رآکتورهای با آب) باشد ۸۸۰ طبقه دارد. بهترین مقدار x_R، تابع رابطهٔ C_Δ / C_E (چون $C_R = ۰$) و معمولاً ۰٫۰۰۲ است. تعداد طبقات ردی، ۶۴۰ خواهد بود.

جدولهایی از مقادیر C_P و Δ تابعی از x_P در دست است. بهای اورانیم غنی شده، قیمت واحد کار جداسازی را به ما می‌دهد که شامل استهلاک کارخانه، هزینه‌های کارگری و قیمت انرژی به‌کار رفته است. تفصیل این قیمتها در دست نیست، تنها می‌توان استنتاج کرد که مصرف برق و مقدار تولید کارخانه‌های جداسازی با روش دیفوزیون، امکان می‌دهد که تخمین بزنیم که مصرف $۵۰۰ \pm ۱۰۰\,\mathrm{kWh}$ برای هر گرم $U۲۳۵$ افزوده شده است و یک «واحد کار جداسازی» مربوط به مصرف $۲۵۰۰ \pm ۵۰۰\,\mathrm{kWh}$ است دست‌کم (برای کار غنی‌سازی کم).

بنابراین، کارخانهٔ اورودیف که گروهی از کشورهای اروپا پیشنهاد ساخت آن را در فرانسه می‌کنند در سال ۱۹۸۰ ظرفیتی برابر $۵ \times ۱۰^{۶}\mathrm{UTS}$ در سال خواهد داشت (که پنج سال پس از آن ظرفیت آن دو برابر خواهد شد)، و ۲۰۰۰ و بعداً ۴۰۰۰ MWé مصرف خواهد کرد و سالانه حدود ۱۵۰۰ تن و بعد ۳۰۰۰ تن اورانیم دارای ۳٪ از ۲۳۵ تولید خواهد کرد که باید حدود ۷۰ تن برای دل نخستین یک رآکتور ۱۰۰۰MWé و یک‌سوم آن برای تجدید سوخت آن در سال باشد. بهای آن با نیروگاههایی که تغذیه می‌کند بین ۱۵ تا ۲۰ میلیارد فرانک (در سال ۱۹۷۵) است. قیمت برای C_Δ UTS کارخانهٔ کوچکتر، به‌طور چشمگیری بیشتر است.

مسائل مربوط به مرکزگریزی: چون مرکزگریزیهایی که سرعت محیطی آنها بسرعت صوت در هوا می‌رسد ده برابر قیمت دیفوزیون تمام می‌شود، بنابراین، به تعداد طبقات کمتری نیاز ($\alpha - ۱$) است و محصول کلی بسیار کمتر از مقدار محصول در آبشاری از دیفوزیون دارای همان E, P, R, $x_{۰}, x_P, x_R$ می‌باشد. مصرف برق برای هر UTS پنج تا ده بار کمتر از روش دیفوزیونی است.

اما مقدار $\alpha - ۱$ به نسبت مجذور سرعت محیطی تغییر می‌کند و آثار مکانیکی چرخش، سرعتش را محدود می‌سازند. این آثار از یک‌سوی عبارتند از: ارتعاشهای محور که احتمالاً در بعضی از سرعتهای زاویه‌ای، که رابطهٔ ارتفاع به قطر استوانه، آن را معین می‌سازد، با رزونانسهای خطرناک مواجه می‌شوند؛ و از سوی دیگر، اثر نیروی مرکزگریز روی دیوارهٔ بیرونی.

چنانچه فشار ناشی از نیروی مرکزگریز از بار پارگی ماده‌ای که استوانه از آن ساخته شده است بیشتر شود استوانه خرد می‌شود. انرژی لازم برای گردانیدن ماشین، متناسب سبکی این ماشین، کم است، کاربرد فلزات سبک یا پلاستیکی با الیاف شیشه‌ای، یا بهتر، از کربن، که استوانه را سبک و محکم می‌سازد در تکنولوژی دستگاههای مرکزگریز برای $UF_۶$ پذیرش قطعی یافته است.

وانگهی، می‌توان گردش گاز را (با وسایل مکانیکی یا گرمایی) چنان ترتیب داد که تنها یک استوانهٔ گردان با چندین طبقه هم‌ارز باشد. در اینجا مانند کارخانه‌های دیفوزیونی راه‌حلهای شایسته پنهان نگاهداشته می‌شوند. از استوانه‌های با ۴۵ سانتیمتر قطر و ۳٫۱۵ متر طول سخن می‌رود که سرعت محیطی آنها $۳۲۰ \pm ۲۰ \mathrm{ms}^{-۱}$ می‌باشد. مدت کاربرد هر ماشین را بیش از ده سال تخمین می‌زنند.

آبشارهای آزمایشی با حدود ۱۰۰۰۰۰ دستگاه مرکزگریز در دوازده طبقه ($x_P \sim ۰٫۰۲, x_R \sim ۰٫۰۰۲$) و با ظرفیتی عملاً حدود ۲×۱۰^{۵}UTS یا فعال‌اند یا در مرحلهٔ طراحی. اعلام شده است که ظرفیت هر واحد C_Δ هرگز از ظرفیت $۱۰^{۶}$UTS در سال کمتر نخواهد بود و می‌توان با دو میلیون دستگاه مرکزگریز، ظرفیتی برابر $۱۰^{۷}$ به‌دست آورد.

هر دو روش جداسازی ایزوتوپهای اورانیم استعداد تکمیل دارند. نیاز به اورانیم غنی شده ظاهراً در حدی است که مقایسهٔ فنی ـ اقتصادی هر دو روش، در شرایط واقعی، طی سالهای آینده امکان‌پذیر است.

دربارهٔ جداسازی با شیپوره، اطلاعات موجود باز هم کمتر است. می‌دانیم که یک کارخانهٔ آزمایشی در سال ۱۹۷۵ در آفریقای جنوبی پایه‌گذاری شده است. این کارخانه از مخلوطی از $UF_۶ + H_۲$ استفاده می‌کند. معمولاً چنین می‌اندیشند که سرمایه‌گذاری در چنین کارخانه‌ای با

روشهای دیگر تفاوتی ندارد و مصرف برق آن برای هر واحد کار جداسازی، ۱٫۵ تا ۲ برابر روش دیفوزیون گازی است.

مراحل پس از رآکتور

سوخت شیمیایی که در کورهٔ دیگهای بخار یا سیلندر موتورهای درونسوز کاملاً (یا تقریباً) سوخته می‌شود گازهایی ـ اکثراً H_2O و CO_2 ایجاد می‌کند که در هوا یا اقیانوسها به‌آسانی پراکنده می‌شوند و هیچ‌گونه زیانی ندارند؛ و تراکم CO_2 در هوا، در طول زمان، می‌تواند نتایج اکولوژیکی داشته باشد، که هنوز کاملاً شناخته شده نیست و به پژوهشهای جدی و دشواری نیاز دارد. خاکستر زغال بسیار مزاحم است، اما به‌شکل کم‌وبیش رضایت‌بخشی و معمولاً به‌طور سنتی در دسترس است. مواد نسوخته (اسانس، مازوت، دوده) و بعضی فراورده‌های سوختی (SO_2, CO) که یا نتیجهٔ تنظیم غلط موتور یا ناخالص بودن سوخت هستند موجب زیانهایی هستند که حذف آنها دشوارتر و پرهزینه است؛ اما رفته‌رفته، با بالا رفتن مصرف و کم شدن حساسیت مردم پذیرفتنی شده‌اند.

برعکس رآکتورهای هسته‌ای مستقیماً تنها می‌توانند بخشی از سوخت خود را مصرف کنند (لااقل ۱٪ تا ۱۰٪). با چنین وضعی آنها می‌توانند سوختی تازه و آخال رادیوآکتیو بالقوهٔ بسیار خطرناکی تولید می‌کنند.

یک جنبهٔ برجستهٔ صنعت هسته‌ای، فهم چرخهٔ سوخت است. زمانی‌که یک بار سوختی از رآکتور بیرون می‌آید باید سوخت مصرف ناشده بازیابی شود؛ سوخت تازه تشکیل شده، جدا گردد و هر دو سوخت، از نو قابل استفاده شوند. وانگهی، آخال رادیوآکتیو را باید جدا کرد و آن را «بی‌زیان ساخت». این کار با ایجاد شرایط و نوعی انبارکردن، که در ردیف کارهای مهم این صنعت هستند، انجام می‌گیرد.

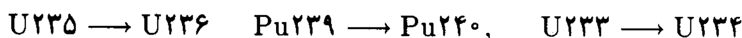
در آغاز عصر هسته‌ای، این بخش مراحل پس از رآکتور، بی‌شبهه به اندازهٔ کافی مورد توجه نبوده است، تنها استخراج پلوتونیم برای مقاصدی، پیش از هرچیز، نظامی را می‌توان استثنا دانست. اما اهمیت اقتصادی و اجتماعی این بخش، اکنون که انرژی اتمی اهمیت واقعی خود را یافته است؛ مطرح می‌شود و برخوردی جدی با مواد شکافت‌پذیر یا بارآور و حفظ سلامت مردم با دور کردن رادیواکتیویته و تشعشع به‌صورتی، بسیار اکید الزامی شده است.

نویدهای رآکتورهای بارآور: روش شکافت هسته‌ای، چنانچه منحصر به مصرف اورانیم ۲۳۵ باشد، تنها یک راه‌حل گذرا برای جبران کمبود انرژی است. اما این انرژی پتانسیل، با استحاله

(ترانسموتاسیون) هم‌زمان با شکافت هسته‌های بارآور U۲۳۸ یا Th۲۳۲ مربوط به سوختهای «مصنوعی»: به‌ترتیب Pu۲۳۹ و U۲۳۳، چند برابر می‌شود. همچنین ممکن است (و در تجربه ثابت شده است) که رآکتورهایی با نام «بارآور» بیش از مقدار مصرف خود، سوخت تولید می‌کنند. برتری این رآکتورها دو چندان است: از یک‌سوی مصرف کامل ذخایر U و Th که اصولاً وجود دارد؛ و از سوی دیگر چون رآکتورهای بارآور کاربرد سوختهای گرانتر را اجازه می‌دهند بنابراین، کانیهای فقیرتر ـ ذخایر طبیعی بسیار زیادتر می‌شوند.

این آینده از همان سال ۱۹۴۵ با روشنی به‌چشم می‌خورد. و نیز از همان زمان می‌دانستند که رآکتورهای بارآور، دماهایی از بخار در همان ردیف دمای بخار بهترین دیگ را تحمل می‌کنند درصورتی‌که رآکتورهایی که اکنون در بازار رواج دارند چنین نیستند. بنابراین، می‌توان فهمید که چرا برنامه‌های صنعتی کنونی تنها از رآکتورهای غیربارآور سود می‌برند و صرفاً چند ماشین نمایشی یا پیش‌نمونهٔ از نوع بارآور می‌باشند.

علت اصلی چنین وضعی این است که رآکتورهای با نوترونهای سریع عملاً تنها رآکتورهای بارآور هستند. مدلهایی از رآکتورهای با نوترونهای گرمایی می‌توانند مقدار بسیارکمی بیش از مصرف خود، سوخت تولید کنند، گرچه چنین چیزی هنوز در عمل ثابت نشده است. در واقع هسته‌های شکافت‌پذیر با گیر انداختن یک نوترون در همهٔ موارد شکسته نمی‌شوند. ممکن است این نوترون را نگاهدارند و یک هستهٔ شکافت‌ناپذیر تولید کنند


$$U۲۳۵ \longrightarrow U۲۳۶ \quad Pu۲۳۹ \longrightarrow Pu۲۴۰, \quad U۲۳۳ \longrightarrow U۲۳۴$$

و رابطهٔ گیراندازی روی شکافت برای نوترونهای گرمایی آشکارا بسیار بزرگتر از نوترونهای سریع است. رآکتورهای با نوترونهای سریع برای اینکه بارآورهای مؤثری باشند به سوختهای دارای غلظت زیاد از هسته‌های شکافت‌پذیر Pu۲۳۳ و U۲۳۳ یا ۲۳۵ Uنیازمند هستند. بنابراین، سوختهای مصنوعی (U۲۳۳ و Pu۲۳۹) باید در رآکتورهای دیگری تولید شده باشند و تنها رآکتورهایی که U۲۳۵ مصرف می‌کنند می‌توانند آن سوختها را خود تهیه کنند. تجمع پلوتونیم، آهسته است (تولید U۲۳۳ هنوز در عمل انجام نشده است) و بخشی از این عنصر، لااقل موقتاً، در انبارهای سلاحهای هسته‌ای، ذخیره شده‌اند. وانگهی پیشرفت تکنولوژی برای رآکتورهای با نوترونهای سریع بسیار دشوارتر است (به‌علت استفاده از پلوتونیم که در ۱۹۴۰ به تنهایی کشف شد و نیز کاربرد سدیم، گرمابر رواج زیادی ندارد)؛ چنانچه زمانی جامهٔ عمل بپوشد شاید بدون مشکلات خاصی متداول گردد (شکلهای ۱۲۳ و ۱۲۴).

با این‌همه رواج رآکتورهای بارآور ناچار بسیار آهسته خواهد بود. از یکسوی نیازمند وجود رآکتورهای قبلی هستند که می‌بایست تا زمانی‌که از نظر اقتصادی ارزش دارند، لااقل بیست، سی، چهل سال دیگر و یا حتی بیشتر در کار باشند. از سوی دیگر، چنانچه از اتم شکافته شده تعداد ۱٫۱ تا ۱٫۵ اتم Pu تشکیل شود بخشی از این پلوتونیم در جا مصرف شده است. بهینهٔ اقتصادی لزوماً با بهینهٔ بارآوری، منطبق نیست. بر پایهٔ همهٔ این دلایل رآکتورهای بارآور نمی‌توانند لااقل طی ۲۰ سال هم (۱۵ تا ۳۰ سال، برحسب نوع مدل و برآورد) سوخت اولیه خود را بازیابی کنند، مدتی که از دو برابر زمان پیش‌بینی شده ـ ۱۰ تا ۱۵ سال ـ برای یک واحد الکتریکی تأسیس شده بیشتر است. سرانجام باید مخالفتهایی را هم که با انرژی هسته‌ای بویژه رآکتورهای با نوترونهای سریع می‌شود در نظر گرفت، عاملی که بررسی و ساختمان آنها را بویژه در ممالک متحدهٔ امریکا، کند کرده است درحالی‌که برخورد آنها با ذخیره‌سازی اورانیم طبیعی و غنی شده، چنان بالا گرفته است که بزودی نیروگاههای هسته‌ای را هم شامل خواهد شد.

نخستین استخراج صنعتی پلوتونیم: در مراحل پس از رآکتور، جریان کار با تخلیهٔ عناصر سوخت آغاز می‌شود. خاصیت رادیواکتیویتهٔ این عناصر، پیش از هرچیز برخاسته از فراورده‌های شکافتی آنهاست که نخست بسرعت با ضریب ۱۰ طی چند روز، ۱۰۰ در چند ماه و سپس آهسته کاهش می‌یابد. تنها در این زمان است که می‌توان آن را بی‌آزار کرد، زیرا هرقدر تشعشعات شدیدتر باشد تأسیسات، نیازمندی بیشتری به سپرهای ضخیم و در نتیجه گرانتر دارند و واکنشهای شیمیایی نیز بیشتر احتمال برخورد با واکنشهای رادیوشیمیایی.

در این دورهٔ «خنکسازی»، عناصر سوختی در «حوضهای» با عمق چند متری که آب پیوسته تصفیه‌شوندهٔ آنها، امکان جابه‌جا کردن بسیار آسان این قطعات سنگین را می‌دهد و نیز همچون سپری در برابر تشعشع عمل می‌کند، ذخیره می‌شوند.

در ورود به کارخانهٔ بی‌آزارسازی، عنصر سوختی را تکه‌تکه می‌کنند و مدادها را از آنها جدا می‌سازند. سپس خود عنصر سوختی را از غلافش بیرون می‌آورند؛ این کار یا از راه شیمیایی یا به‌طور مکانیکی، یا پیش از و یا در جریان انحلال قبل از جدا کردن پلوتونیم انجام می‌گیرد.

پلوتونیم که تنها عنصر مصنوعی مورد استفادهٔ یک صنعت مهم است در سال ۱۹۴۰ در پرتو یک ایزوتوپ ۲۳۸، با نیم عمر کوتاه (۸۶٫۴ سال) خود شناخته شد. خواص شیمیایی آن نخست با این ایزوتوپ، که چند میلیاردم گرم از آن در دست بود تعیین شد. بعدها بررسی آن را با تکنیکی که از میکروبیولوژی گرفته شده بود ادامه دادند، که بررسیهای شیمیایی را زیر میکروسکوپ،

روی نمونه‌هایی با جرم چند ده میلیونیم گرم از ایزوتوپ ۲۳۹ انجام می‌دادند. این ایزوتوپ از تأثیر نوترونهایی که بوسیلهٔ سیکلوترون تهیه شده بودند، بر اورانیم به‌دست آمد. نتایج این تحقیقات، مهندسان شرکت دوپون دونمور را بر آن داشت که یک کارخانهٔ استخراج طرح و تأسیس کنند که در آن اواسط سال ۱۹۴۵ میله‌های پیلهای هنفرد[1] چند کیلوگرم پلوتونیم تحویل دادند.

اینکه این کارخانه بخوبی هم کار کرده است پیروزی خارق‌العاده‌ای است. نه‌تنها این پیروزی بدون «کارخانهٔ آزمایشی» به‌دست آمد و بزرگترین جهشی که در صنعت شیمی شناخته شده است (از چند میکروگرم به چند کیلوگرم)، بلکه همچنین این کارخانه باید کاملاً از دور اداره شود و پس از آغاز کار، تنها در شرایط بسیار دشوار، دستکاری آن ممکن است.

کارخانه‌های جدید، با این کارخانه بسیار تفاوت دارند و تنها وجه مشترک این دو، اداره آنها از دور، و از پشت سپرهای ضخیمی است که دربرابر تشعشعات حائل می‌شوند و نیز دشواری دستکاری یا ایجاد تغییرات مهم در آنها، به‌مناسبت خطر تشعشع است.

پلوتونیمی که در اورانیم پیلها تشکیل می‌شود ناگزیر همراه تکه‌هایی از شکافته‌هایی است که بشدت رادیوآکتیو هستند.

برای اینکه قاعده‌ای از مقادیر به‌دست دهیم رآکتوری با اورانیم طبیعی یا کمی غنی شده را در نظر می‌گیریم که سوخت آن پیش از آنکه عوض شود مقدار ۱۰ هزار تا ۲۰ هزار MWj/t تولید می‌کند. بدین‌ترتیب در هر سال هر تن اورانیم محتوی در آن، چند کیلوگرم پلوتونیم تولید می‌کند. بنابراین چنانچه سوخت را پس از یک سال کار درمان کنند ،هر تن آن علاوه‌بر وزن اورانیم خود (۱ تا ۲٪ که ۱۰ تا ۲۰ کیلوگرم می‌شود که در شکافت هسته‌ای مصرف می‌شد ـ حدود یک MWj در هر گرم ـ و درصد U۲۳۵ به‌طور محسوسی کاهش می‌یافت) و چند کیلوگرم پلوتونیم، ۱۰ تا ۲۰ کیلوگرم فراورده‌های شکافتی خواهد داشت که رادیواکتیویتهٔ کل آن، دقیقاً در زمان توقف رآکتور، حدود چند میلیارد کوری (واحد رادیواکتیویته که برابر مقدار رادیواکتیویته‌ای است که یک گرم رادیم از خود نشان می‌دهد) خواهد بود.

روشهای جداسازی: کار جداسازی بر پایهٔ این واقعیت است که اورانیم در شکل ۶ والانسی خود پایدار است، درحالی‌که در محیط خنثی یا کمی اکسنده، پلوتونیم، سه یا چهار والانسی است.

1. Hanford

از محلول نیتریکی سوخت، اورانیم و پلوتونیم را در حلالی آلی استخراج می‌کردند، و تقریباً کل فراورده‌های شکافت در محلول آبی باقی می‌ماند. بعداً پلوتونیم را با عملیات اکسندگی و احیاهای متناوب، که امکان به‌کارگیری تراسبهای انتخابی، یا استخراجهایی به کمک حلالها و بالاخره تثبیتها و شست‌وشو با تبادلگرهای یونی را فراهم می‌سازد، از اورانیم جدا می‌کنند. این عملیات تکرار می‌شوند و برحسب مورد طوری اجرا می‌شوند که بازده و خلوص متناسب به‌دست آید. در اصل با روشها و تکنیکهایی که در مراحل پیش از رآکتور، برای اورانیم گفته شد، سروکار داریم. اما در اینجا به کارگیریهایی فرمان از دور، تأثیر تشعشعات بر همهٔ اجزای شیمیایی و بر همه مواد وارد در واکنش و لزوم مبرم جلوگیری از گسسته شدن تصادفی یک واکنش زنجیری در کارخانه، اکیداً باید رعایت شوند. اما اگر اورانیم طبیعی در شیمی خشک یا محلول در آب معمولی آمادگی یابد این خطر وجود ندارد؛ درحالی‌که این خطر در سیستمهای اورانیم طبیعی ـ آب سنگین، یا چنانچه سوختهای غلیظ شده درکارخانه‌های جداسازی ایزوتوپها، نظیر آماده‌سازهای سوختها، عمل آورده شده باشند، وجود دارد. برای رفع این خطر، غلظت محلولها را محدود می‌کنند؛ برای این کار ظرفهایی می‌سازند که حجم و شکل آنها (رابطهٔ بزرگ سطح به حجم)، امکان رسیدن به حالت بحرانی را ندهند؛ با گذاردن پرده‌های ناتراوایی نسبت به نوترون، نظیر ورقهای آهنی کادمیم‌دار، در بین یا اطراف آنها بدین هدف دست می‌یابند (شکل ۱۲۵).

بازار دادوستد پلوتونیم هنوز به سطح عادی نرسیده است. کارخانه‌های آماده‌سازی سوخت، تا امروز، در مالکیت دولت هستند و هزینهٔ آماده‌سازی آنها برای دارندگان رآکتورهای با آب، حدود ۸۰۰ فرانک برای هر کیلوگرم است. در ممالک متحدهٔ امریکا، پلوتونیمی که به‌دست می‌آید، دولت به‌بهای هر گرم در حدود ۵۰ فرانک می‌خرد و در بازار سیاه، پلوتونیم به‌بهای پنج برابر فروخته می‌شود. ظرفیت آماده‌سازی کنونی جهان، تکافوی تولید روزافزون برق هسته‌ای را نمی‌کند و باید بی‌درنگ به ساختن کارخانه‌ای دیگر همت گماشت.

ایزوتوپهای پلوتونیم: پلوتونیم ۲۳۹ همین‌که در پیلی تشکیل شد نوترونها را جذب می‌کند. بعضی از این نوترونها آن را می‌شکافند و فراوردهٔ گرمای هسته‌ای به نگاهداری آن کمک می‌کند. نوترونهای دیگر گیر می‌افتند و پلوتونیم ۲۴۰ تشکیل می‌شود. تا مدتها، عنصر پلوتونیم پس از تشکیل در پیل می‌ماند و از ایزوتوپ ۲۴۰ غنی می‌شد. این ایزوتوپ برای انفجار پلوتونیم زیان داشت به‌طوری‌که درحال‌حاضر از ورود آن به گستردگی جلو می‌گیرند. بنابراین تولید پلوتونیم «انفجاری» می‌تواند مدت اقامت میله‌های اورانیم در پیل را محدود سازد درحالی‌که اگر بخواهند پلوتونیم «رآکتوری» یا

شکل ۱۲۵.اصول چرخهٔ سوخت اورانیم ـ پلوتونیم.

چرخهٔ توریم ـ اورانیم ۲۳۳، شبیه بالاست، جز اینکه باید با وارد کردن توریم (که نوترونهای کند آن را نمی‌شکافند) در رآکتوری با اورانیم یا پلوتونیم آن را تحریک کرد.

پلوتونیم «سوختی» که می‌تواند تا ۳۰٪ دارای پلوتونیم ۲۴۰ باشد تولید کنند، ممکن است، تا مدتها آنها را در پیل نگاهداشت.

پلوتونیم ۲۴۰ نیز بنوبهٔ خود، به‌دنبال گیراندازی نوترونها، پلوتونیم ۲۴۱ می‌دهد که نوترونهای کند آن را می‌شکافند، و سپس پلوتونیم ۲۴۲ ایجاد می‌شود. ترکیب ایزوتوپی پلوتونیم موجود در سوخت، همچنین مقدار کل آن طی زمان همراه چگالی و طیف نوترونی در هر نقطه، تغییر می‌کند. بنابراین نوعی پیچیدگی چشمگیری در این تغییر، همراه با زمان، از خصوصیات نوترونی وجود دارد که سازنده و استفاده‌کنندهٔ رآکتور باید آن را دقیقاً در نظر داشته باشد.

آخال رادیوآکتیو: عناصر پلوتونیم و اورانیم همین‌که جدا شدند (گاهی هم عده‌ای از عناصر پس از پلوتونیم مفید) فضولاتی از عملیات آنها می‌ماند که بشدت رادیوآکتیو هستند. پیش از آنکه آنها را به

تفصیل شرح دهیم باید آخال ویژهٔ صنعت هسته‌ای را در کل معرفی نماییم؛ صنعتی که رادیواکتیویته و گوناگونی بی‌شمار صفات شیمیایی و حالتهای فیزیکی از ویژگیهای آن است.

آخال کم رادیوآکتیو: بعضی مواد «بی‌آزار» استخراج معدنی، باقیمانده‌های عملیات گوناگون آزمایشگاهها، آب‌وهوای بعضی مدارهای فرعی کارخانه‌های هسته‌ای و غیره، کمی آلوده به رادیواکتیویته هستند. زمانی‌که مقدار رادیواکتیوی آنها بسیار کم است یا (و) بسرعت مقدار آن کاهش می‌یابد، و بنابراین مقدار آن در زمینهای مجاور کارخانه از محدودهٔ مقرر تجاوز نمی‌کند و از کنترل خارج نمی‌شود می‌توان آنها را آزاد گذاشت تا در اطراف پخش شوند. گاهی هم آنها را در زمینهای اطراف کارخانه دفن می‌کنند تا رادیوآکتیو و نیز اطراف آنها تحت کنترل باشد.

اما بیشتر اوقات آنها را باید زیر نظر انبار کرد. برای این کار، آخال جامد را روی هم انباشته می‌کنند. آنها را کاملاً، تا اندازه‌ای که حالت شبه جامد بیابند تبخیر می‌کنند. همهٔ این اقدامات، با احتیاط تمام، برای تهیه یک جسم نهایی ـ تا حد امکان از نظر شیمیایی، خنثی ـ انجام می‌گیرد. سرانجام این جسم را در محفظهٔ آب‌بندی شده‌ای (از فلز یا بتون) می‌گذارند و در جایی قرار می‌دهند که بتوانند تشعشعات آن را پیوسته کنترل کنند؛ حالت این محفظه‌ها و در صورت لزوم مقدار رادیواکتیویتهٔ آبهایی که از محل ذخیره می‌گذرند باید تحت کنترل باشند. در چنین حالتی اگر محفظه کمی هم آسیب ببیند زیاد مهم نیست؛ در واقع، کمی رادیواکتیویته، لختی شیمیایی و جامد بودن محتوی آن در تمام مدت تأثیر دارند. در واقع آخالی از این دست آن‌قدرکم خطرناک هستند که چندین بار آنها را در اعماق دریا ریخته‌اند. این کار، که اکنون برای احترام به برخی اعتراضات، برمبنای امکان تغلیظ آهسته و انتخابی عناصر پرتوزای در طول دورانی از سراسر «زنجیر تغذیه» که از آب و ته‌نشستها به پلانکتونها، به جلبکها به ماهیها و بالاخره به انسان پایان می‌پذیرد، محدود است؛ زمانی‌که نظرات دقیق‌تر و عموماً آگاهانه‌تر شوند، احتمال دارد شدت گیرد.

آخال پر رادیوآکتیو: اما، شماری از عملیات هسته‌ای، ایجاد آخالی با رادیواکتیویتهٔ قوی می‌کنند، این آخال باید با احتیاط تمام دست‌کاری و کم خطر شوند. نخست، مهمترین فراورده‌ها، آنهایی هستند که به چرخهٔ سوخت بستگی دارند و مهمترین این فراورده‌ها نیز فراورده‌های شکافت هستند. اما فراورده‌های مهم دیگری نیز وجود دارند، مثلاً غلافهای عناصر سوختی که از رآکتور تخلیه می‌شوند و غالباً آنها را به‌طور مکانیکی از خود جدا می‌کنند. این غلافها نه‌تنها دارای ایزوتوپهایی هستند که بوسیله نوترونها در جرم آنها تشکیل شده‌اند، بلکه کمی هم از سوخت، چسبیده به آنها مانده است.

عنصر رادون که از کانه‌ها می‌گریزد باید به کمک هوادهی شدیدی از سرسرای معدن بیرون رانده شود. پس از تهویه، به‌علت لختی زیاد شیمیایی و عمر بسیار کم آن، می‌توان آن را آزاد گذاشت تا در هوا پراکنده شود (و در آنجا خاک از راههای گوناگون به‌مقدار قابل توجهی، پیوسته بدان تزریق می‌شود.) هوایی که از نزدیک یک رآکتور می‌گذرد مقداری ^{14}C دارد که از واکنش $^{14}N(n,p)$ و نیز ^{41}A از $^{40}A(n,\gamma)$ و ^{85}Kr و $^{84}Kr(n,\gamma)$ نتیجه شده است. با در نظر گرفتن بخصوص عمر دراز عنصر اخیر نمی‌توان آن را فارغ‌البال در هوا رهاکرد تا بدین‌ترتیب تغییر یافته و از نو وارد هوا شود. احتیاطهای لازم فراتر از این نوع نگاهداری زودگذر، ایجاب می‌کند که آن را در یک حجم واسط وارد کنند تا کاهش رادیواکتیویتهٔ کم عمر امکان یابد و کریپتون از آن جدا شود (مثلاً، از راه جذب سطحی در دمای پایین)، سپس آن را انبار کنند. چنانکه دیده می‌شود با مشکلات گوناگونی سروکار داریم که در اینجا به آوردن چند مثال بسنده می‌کنیم.

فراورده‌های شکافتی: به فراورده‌های شکافتی بازگردیم. آنها شامل حدود ۲۰۰ ایزوتوپ هستند که بین عددهای جرمی ۷۰ و ۱۶۰ و بین عددهای اتمی ۳۰ و ۶۵ توزیع شده‌اند. این اعداد تغییر کمی دارند و همچنین فراوانی نسبی هستک (نوکلئید)های گوناگون، برحسب هستهٔ شکافته شده و انرژی نوترون. در اینجا بویژه عناصر: ۴۳ تکنسیم و ۶۱ پرومتیم وجود دارند که نه ایزوتوپ پایداری دارند و نه ایزوتوپ رادیوآکتیو با طول عمری که در طبیعت یافت می‌شوند. در اینجا همچنین می‌توان با گازهای کمیاب روبه‌رو شد که بیش از ۱۰٪ کل را تشکیل می‌دهند و وجود آنها انگیزه دشواریهای ویژه‌ای چه در زمینهٔ تعریف عناصر سوختی (همان‌طورکه دیدیم) و چه در زمینهٔ آماده‌سازیهای شیمیایی است. این فراورده‌های شکافتی در تقریباً کل خود، رادیوآکتیو هستند و باید برای گذر از فراوردهٔ اولیه به یک ایزوتوپ پایدار، یک تا پنج رادیواکتیویتهٔ پیاپی را شاهد بود.

رادیواکتیوی که بزرگترین عدد را در فراورده‌های شکافتی دارد و عمر آن نیز کوتاه است عملاً در جریان تغییرات شیمیایی سوختهای هسته‌ای ناپدید می‌شود. اما با این‌همه، آنهایی که عمرشان میان چند ماه تا چند ده سال است، منبع دیرپای و پرقدرت رادیوآکتیو می‌باشند.

در رآکتوری که به مدت یک تا سه سال با قدرت P کارکرده است، قدرتی که صرف فراورده‌های شکافت شده است، این قدرت، سه ماه پس از توقف، حدود ۰٫۰۰۱p می‌باشد، سپس با آهستگی تمام کاهش می‌یابد. این واقعیت زمانی‌که با زبان رادیواکتیویته سخن می‌گوییم، چنین است: سه

ماه پس از توقف، برای رآکتورهای با دل دارای قدرت ۱۰۰۰MWé به‌طورکلی $۱۰^۷$ کوری یا یک تا دو کوری برای هر گرم سوخت می‌باشد.

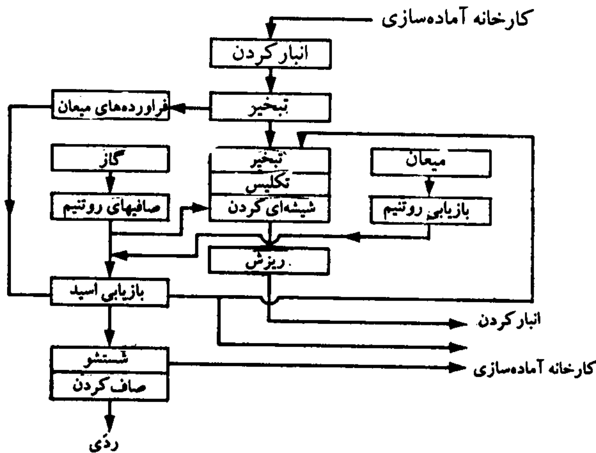
بیشتر آخال پر آکتیویته، محلول نیتریک این فراورده‌هاست که باید برای مدتها تحت مراقبت شدید، آن را نگاهداری کرد.

درحال‌حاضر این محلول را به‌شکل مایع (گاهی هم پس از تبخیر جزئی برای کم کردن حجم آن) در ظرفهای بزرگ با گنجایش ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر مکعبی از جنس فولاد زنگ‌ناپذیر نگاهداری می‌کنند. این ظرفها باید خنک نگاهداشته شوند تا گرمای برخاسته از رادیواکتیویته برطرف شود. اطراف این ظرفها باید سپرهایی گذاشته شود تا از عملیات کنترل و نگاهداری اطمینان باشد. برای احتیاط از نشتی بودن ظرف و جلوگیری از آلودگی محیط اطراف آن، ظرف را دوجداره می‌سازند و یا لااقل طوری آن را جا می‌گذارند که همهٔ مایع ناپدید شده را بتوان از نو به‌دست آورد. به تعدادی ظرفهای کمکی، شبکه‌ای از لوله‌ها، تلمبه‌ها، ابزار اندازه‌گیری و غیره نیاز است. این نوع انبارداری، به علل هزینه و جاگیری زیاد، تنها می‌تواند موقتی باشد. این واقعیت که سهل‌انگاری موجب ناپدید شدن حجم بزرگی از این محلولها می‌شود، نظر بالا را تأیید می‌کند. معلوم شده است که خاک یک تبادلگر عالی یونهاست و فراورده‌های زیان‌بخش را مدتها در خود نگاه می‌دارد تا وارد آبهای مجاور نشوند. اما نباید با تکیه بر این خاصیت خاکها آسوده‌خاطر بود.

محافظت از آخال فعال: هنوز هیچ محلولی به‌طور قطعی پذیرفته نشده است. اما چندین محلول بررسی شده و بعضی هم مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

خصیصهٔ مشترک این محلولها، کاهش حجم و وارد کردن آخال در بدن اجسام جامدی است که خوردگی آنها بوسیلهٔ آب بسیار کم است. زیرا در نظر است تا این‌گونه قطعات را بتوانند در لفافهایی (فلزی یا بتونی عاری از فراورده‌های رادیوآکتیو)، بدون هیچ‌گونه آماده‌سازی، برای چند ده‌سال و حتی یک سده، نگاهدارند. این کار تنها با خنثی کردن، تبخیر و داخل کردن، تبخیر و داخل کردن گردها یا محلولهای بسیار غلیظ در جسم بتونها، شیشه‌ها، یا (و) اجرام آسفالتی عملی است. بدون اینکه این روشها را به‌تفصیل بیان کنیم می‌توان بدرستی پیشگویی کرد که همهٔ آخال دارای رادیواکتیویتهٔ زیاد که از یک رآکتور ۱۰۰۰MWé نتیجه می‌شوند می‌توانند سالانه حجمی برابر ۱ تا ۳ مترمکعب داشته باشند (شکل ۱۲۶).

بدین‌ترتیب، می‌توان این قطعات را، بدون هیچ‌گونه تماسی با آب، در انبارهای زیر مراقبت طوری نگاهداشت که آنهایی که عیبی از خود نشان می‌دهند بیرون آورده شوند و مطمئن بود که



شکل ۱۲۶.نمایهٔ شیشه‌ای کردن آخال هسته‌ای پر رادیوآکتیو.

هرگز محیط را آلوده نخواهند کرد. اما در دراز مدت، این امر متضمن جاگیری زیاد و هزینه‌ای است که برای کاهش آن کوشش می‌شود و بنابراین برای یافتن روشهایی جهت «ناپدید کردن آخال» کوششهای به‌عمل آمد تا روشهایی که بدون اینکه ازدیاد ذخایر مرئی و تحت مراقبت را دربر داشته باشد اطمینان کامل را ایجاد کند. پیشنهاد فرستادن این آخال به فضای بیرون از میدان گرانش زمین، شدنی نیست، زیرا هم هزینهٔ آن زیاد است و هم خطر اشتباه در پرتاب وجود دارد. ما این را تأکید می‌کنیم، زیرا حتی ممکن است کار ناپخته‌ای انجام گیرد و مسأله را دشوارتر سازد.

باید گفت برای سود گرفتن از تابشهای رادیوآکتیو جهت گرم کردن قطعات نیز فکر شده است. این قطعات را در چاه قرار می‌دهند، خاک زیر آنها ذوب می‌شود و قطعات در خاک دفن می‌گردند و روی آنها را لایهٔ نفوذناپذیری از سنگ ایجاد شده می‌پوشاند. نخستین اقدام در این راه، در لایه‌های یخ دارای ضخامت چندین کیلومتر گزارش شد که در گروئنلند و در قارهٔ جنوبگان (آنتارکتیک) در دشتی بازالتی قرار دارند. دوری این نواحی، احساس امنیت القا می‌کند اما حمل‌ونقل آن گران و پر دردسر است.

شاید ـ بی‌شبهه، انسان چنین می‌اندیشد ـ که روش دفن کردن بعدها عملی شود. اما اکنون با نداشتن اطلاعات کافی از محتویات این قطعات و گردش آهستهٔ آبهای زیرزمینی ژرف نمی‌توان این روش را به‌کار گرفت.

تنها چیزی که هم‌اکنون عملی به‌نظر می‌رسد دفن این قطعات در لایه‌های نمک است. لایه‌های نمک با ضخامت زیاد در کشورهای متعددی و در عمق متوسط وجود دارند. خود وجود آنها و به تجربهٔ سده‌ها در استخراج آنها ثابت می‌کنند که آنها در فرماسیونهایی از زمین‌شناسی یافت می‌شوند که گردش آب در آنها از هزارها سال پیش قطع شده است. گفته می‌شود که بدین توده‌ها، بویژه به معدنهای متروک آنها بخوبی می‌توان اعتماد کرد. در این معادن می‌توان سالنهایی ایجاد کرد که خاک نمکین چاههای آن، قطعات آخال را دربرگیرد، اما به شرطی که کار دفن آنها، این بار، بدون نقشه و طرح نباشد. طرحهای مشخص این کار آماده هستند اما عملی کردن آنها، بدون اینکه مردم و مقامات محلی به بی‌زیان بودن آن قانع شوند محال است.

ساخت انبارهای موقتی تحت مراقبت فعلاً تنها امکان موجود است.

در دراز مدت، رادیواکتیویتهٔ آخال هسته‌ای تنها در ذراتی از پلوتونیم باقی خواهد ماند؛ این ذرات از مرحلهٔ آماده‌سازی گریخته‌اند و در مقدارکمی از عناصر پس از پلوتونیم با عمر زیاد وجود دارند و ذرات α انتشار می‌دهند. می‌توان دربارهٔ جداسازی شیمیایی آنها هم اندیشید و آنها را به فراورده‌هایی با عمر کوتاه تبدیل کرد (از راه شکافت هسته‌ای یا گیراندازی نوترونی). برای این کار آنها را در رآکتورها در معرض برخوردهای نوترونی قرار می‌دهند. باز هم باید از طرحهایی یاد کرد که اصول آنها درحال بررسی است اما عملی کردن احتمالی آنها درحال‌حاضر، صرفاً بمنظور یادآوری است.

به‌کارگیری بعضی آخالها: بعضی از آخالهای بسیار گوناگون، که ما جمع آنها را بررسی می‌کنیم، فوایدی دربر دارند. اینها ایزوتوپهایی هستند که در ابزارهای اندازه‌گیری برای پژوهشهایی به‌کار گرفته می‌شوند یا در تجهیزاتی که از انرژی تشعشعی آنها برای گرم کردن استفاده می‌شود و نیز در مولدهای ترموالکتریکی (دستگاههای شوک قلب، بویه‌های اقیانوسها، ابزارهای فضانوردی) به‌کار می‌روند. اما همگی این کاربردها تنها بخش بسیار کوچکی از این فراورده‌ها را مورد استفاده قرار می‌دهند. می‌توان کاربرد تشعشع را مثلاً برای فرایند صنعت رادیوشیمیایی (پولیمرسازی، استریل کردن و ...) در نظر گرفت. این زمینه هم مصرف چندانی ندارد، گرچه آزمایشهایی امکان سودبخشی را نشان می‌دهند. همهٔ این موارد هرگز از ناگریزی انبارکردن نهایی آخالها چیزی کم نمی‌کنند.

سرانجام آخالهای هسته‌ای را می‌توان همچون کانه‌های عناصرکمیاب دانست. بدین‌ترتیب زنجیرهٔ فراورده‌های شکافتی با عدد جرمی ۱۰۱ به ۱۰۶، ۱۰۸ و ۱۱۰ با ایزوتوپها پایدار فلزات گرانبهای روتنیم، روديم و پالاديم پایان می‌یابند. بازده

کل آنها در حدود ۵٪ است، یعنی حدود ۲۵ گرم در هر کیلوگرم فراورده‌های کلی. یک رآکتور ۱۰۰۰MWe (یا ۳۰۰۰MWth) در سال ۷۰۰۰ ساعت کار می‌کند و حدود ۲۰ کیلوگرم در سال تولید دارد. در یک قدرت کلی مربوط به پایان این سده، حدود 10^6MWé یا حدود ۲۰ تن در سال از آن به‌دست می‌آورند (تولید کنونی این فلزات در سال به ۱۰۰ تن نمی‌رسد).

تشعشات و ایمنی: تمام آنچه گفته شد این واقعیت را تأکید می‌کند که انرژی هسته‌ای، جوامع ما را دربرابر مشکل مهمی قرار داده است و آن: حفظ سلامت مردم دربرابر تشعشع است. از آغاز این سده با اکتشافات پیاپی اشعهٔ X، رادیواکتیویته، تشعشعات کیهانی و کاربردهای دو اکتشاف نخستین در عمل، این مشکل شناخته شد. اما انرژی هسته‌ای هم‌اکنون و در آینده نیز به مقیاس وسیعی روی درگسترش دارد، این گسترش در شدت، شمار و پخش منابع تشعشع است. محقق است که همهٔ اینها در ساختمانها جای دارند. وانگهی آنها را مجموعه‌ای از مقررات و روشهای کاربردی، محافظت و مراقبت می‌نمایند. با همهٔ آنها «وحشت بزرگی» در دلها موج می‌زند که برخاسته از: خاطرهٔ معایب عملیات جنگی و انفجارهایی است که ورود انرژی هسته‌ای را به جهانیان اعلام داشتند؛ نادانی کلی از این انرژی و تکنولوژی نوین آن و به‌طورکلی ارزیابی خطرهای آن برای جریان عادی زندگی؛ ترس از نوآورده‌ها و این واقعیت انکارناپذیر که این شیاطین، که تا مدتها حضور خواهند داشت، در اثر تشعشات بسیار ضعیف هم تحریک می‌شوند و نه‌تنها به خود افراد تحت تشعشع آسیب می‌رسانند بلکه نسل آنها را آلوده می‌سازند. مقررات جهانی سقف و حداکثر مقداری را که هرکس می‌تواند هم درکوتاه‌مدت و هم در همه زندگی خود آن را دریافت دارد تعیین کرده است به بیان انرژی، اندازهٔ آنها بسیار کم است. در واقع خوراک حداکثر سالانه نیم *Rem* است که تقریباً برابر $0{,}5 \times 10^{-5}$ J/g می‌شود که برای یک شخص ۶۰ کیلوگرمی کمتر از ۰٫۱ کالری است، که برای اینکه ایجاد سوختگی کند بسیارکم است. اما زمانی‌که تمام بدن برای لحظه‌ای تحت تشعشع ۵۰۰rem قرارگیرد به احتمال ۵۰٪ طی چند هفته خواهد مرد.

از سوی دیگر، باید چند واقعیت اساسی را خاطرنشان ساخت:

تشعشعات جزئی شدید بخوبی تحمل می‌شوند، مثلاً ۲۰rem در رادیوگرافی لولهٔ گوارش، بدون اینکه از صدها rem سخن بگوییم که در درمان بعضی سرطانها اعمال می‌شوند؛ تابشهای کیهانی و رادیواکتیویتهٔ خاک به‌طور متوسط در سال ۰٫۱۲۵rem می‌دهند که برحسب ارتفاع که در جذب تابشهای کیهانی از راه هوا مؤثر است و نوع خاک و خانه که کم‌وبیش رادیم دارند از ۰٫۰۸

جدول ۴. ارقام اقتصادی صنعت هسته‌ای در سال ۱۹۷۷

نوع تأسیسات	ظرفیت	ظرفیت الکتریکی کل[1] MWé	سرمایه ثابت (10^6 فرانک)	بهای واحد فراورده یا روش	پیش‌بینی مدت قابل استفاده به سال	مدت ساختمان به سال
نیروگاه هسته‌ای	۱۰۰۰ MWé	۱۰۰۰	۲۵۰۰	۰٫۰۷۵F/kWh	۳۰_۴۰	۶_۱۰
معدن و کارخانهٔ آماده‌سازی کانه‌ها	۲۰۰۰ تن در سال U_3O_8	۹۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰_۳۰۰ فرانک برای هر کیلوگرم U_3O_8	۱۰_۲۰	۵_۱۰
خالص کردن و (یا) تبدیل به UO_2 یا UF_6	۵۰۰۰ تن در سال U	۲۵۰۰۰	۲۵۰	۱۵_۲۰ فرانک هر کیلوگرم U	۱۵_۲۵	۳_۵
کارخانهٔ جداسازی ایزوتوپها:						
با روش دیفوزیون (نفوذی)	۱۰۰۰۰ UTS	۱۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۴۸۰ فرانک هر کیلوگرم UTS	۲۰_۴۰	۷_۱۰
با روش مرکزگریزی	۳۰۰۰ UTS	۳۰۰۰۰	۵۰۰۰			۵
تولید مواد سوختی:						
رآکتور با آب UO_2	۱۵۰۰ تن در سال U	۵۰۰۰۰	۵۰۰	۶۰۰_۸۰۰ فرانک هر کیلو U	۱۵_۲۵	۳_۵
$UO_2 + PuO_2$	۱۵۰۰ تن در سال U ± Pu	۵۰۰۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰ فرانک هر کیلو U+Pu		
رآکتور با نوترون سریع (دل) $UO_2 + PuO_2$	۱۵۰ تن در سال U + Pu	۵۰۰۰۰	۵۰۰	۴۰۰۰_۵۰۰۰ فرانک هر کیلو U+Pu		
آماده‌سازی شیمیایی سوخت:						
رآکتور با آب	۱۵۰۰ تن در سال U + Pu	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰_۱۵۰۰ فرانک هر کیلوگرم	۱۵_۲۵	۵_۷
رآکتور سریع (دل + پوشش)	۳۰۰ تن در سال	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰۰ فرانک هر کیلوگرم		
انبار کردن	۱۵۰۰ تن	۲۰۰۰۰	۱۵۰	۵۰ فرانک در سال هر کیلوگرم U	۵۰	۱_۲
حمل‌ونقل				۷۵_۱۵۰ فرانک هر کیلوگرم U		

۱. این ظرفیت برای همه عمر یک رآکتور با آب تحت فشار حساب شده است، چنانچه تنها بار اولیه سوخت را حساب کنند، این اعداد باید بر ۳ تقسیم شوند.

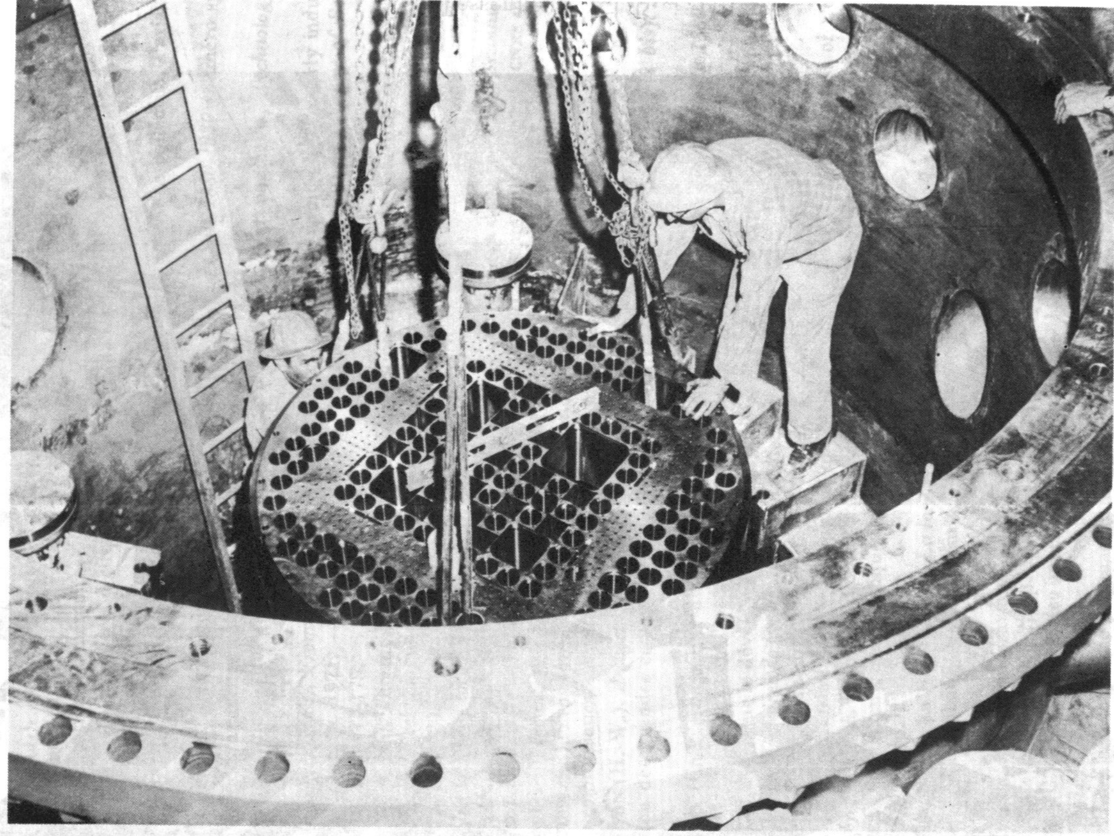
تا ۰٫۴ یا حتی ۰٫۵ تغییر می‌کنند؛ سهم صنعت هسته‌ای در میدان تشعشعات، که انسان از آغاز پیدایش در آن شناور است؛ اکنون بخش بسیار کوچکی (۱ تا ۲٪) نه‌تنها از میانگین این میدان، بلکه همچنین تغییرات آن را، که در بالا گفته شده‌اند، تشکیل می‌دهد.

سهم متوسط ۱۰٪ این میانگین وابسته به کاربردهای پزشکی، تشخیص و درمان با اشعه است، که هیچ‌گونه آثار کلی قابل مشاهده‌ای ندارند.

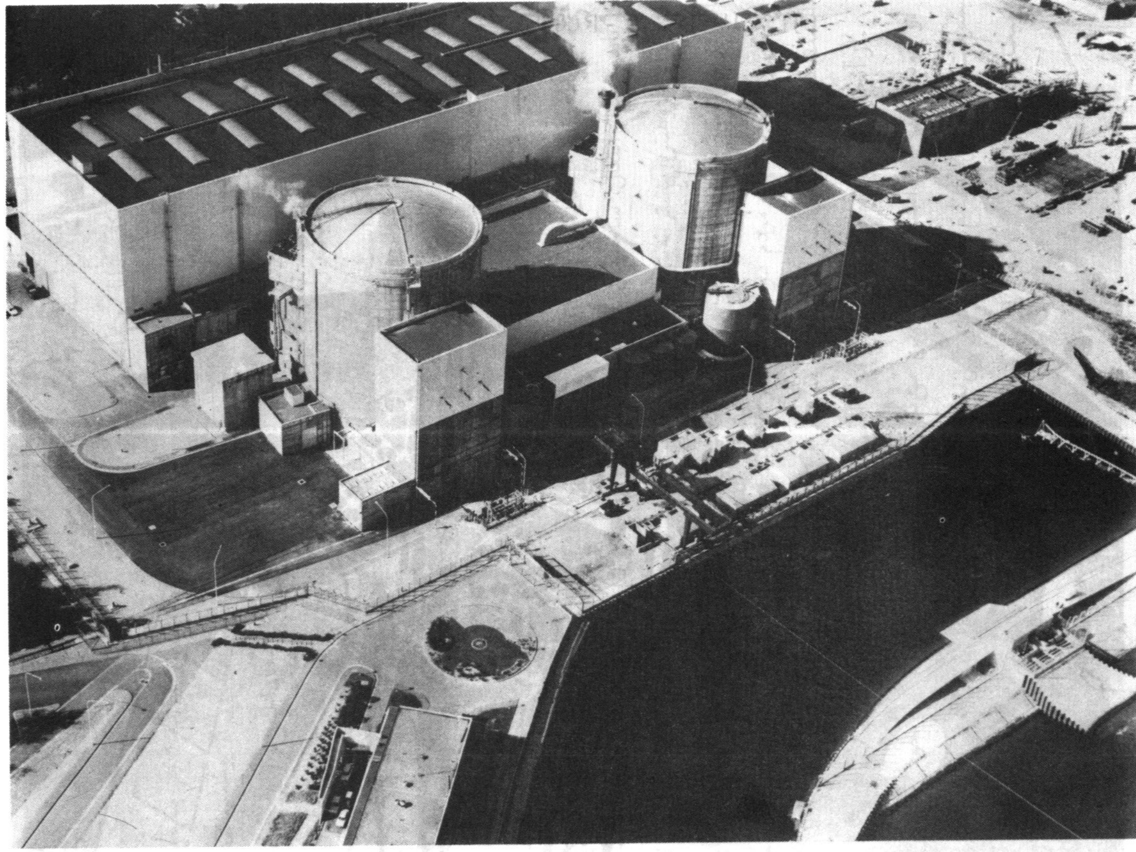
همه اینها نوعی صنعت هسته‌ای را شامل می‌شوند که معمولی کار می‌کند؛ جز پیشامدهای کوچک، با حوادث دیگری برخورد نمی‌کند؛ نشت قابل توجه رادیوآکتیو به بیرون از پوشش آن وجود ندارد. خطرات یک حادثهٔ بزرگ نشتی قابل درک است. نتایج چنین حادثه‌ای با آثار برخاسته از شکستن یک سد، وقوع یک زلزله یا مصیبتهای دیگر طبیعی قابل مقایسه است. اما احتمال وقوع چنین حوادثی بسیار کم است. مثلاً در یک رآکتور با آب سنگین ۱۰۰۰ MW، احتمال وقوع چنین حوادثی برابر 10^{-6} است. اما این اظهارنظرها، بسیار تقریبی هستند، بویژه که فاقد (خوشبختانه) تجربهٔ ملموس هستیم.

در اینجا نمی‌توان مطلب را بیش از این به درازا کشانید. هیچ چیز لزوم هشیاری بسیار زیاد را نفی نمی‌کند. این هشیاری نه‌تنها برای کارشناسان وکارکنان این صنعت ناگزیر است بلکه مردم عادی نیز باید هشیار انتقال، ساختمان، کار و مقررات صنعت هسته‌ای باشند. هچنین باید به کوششهای خود برای پژوهش بیشتر نه‌تنها در محدودهٔ تکنیک و ایمنی هسته‌ای استمرار داد بلکه این تلاش باید در زیست‌شناسی تشعشعات و همهٔ جوانب هسته‌ای در بوم‌شناسی به‌عمل آید؛ و نیز باید در آموزش و آگاه ساختن مردم در این زمینه فعال بود؛ فعالیت اخیر را می‌توان در ردیف کوششهایی دانست که پس از کار پاستور در میکروب‌شناسی، در جهت بهداشت مردم به‌عمل می‌آید.

از آنچه گفته شد چنین برمی‌آید که همهٔ افراد باید دربارهٔ آیندهٔ صنعت هسته‌ای آموزش ببینند و از خود عقیده‌ای داشته باشند. چنین می‌نماید که مؤلف این اثر نباید عقیدهٔ خود را پنهان کند: پیشرفت سریع این صنایع نه‌تنها ناگزیر می‌نماید بلکه امیدبخش است؛ چنین باوری با درنظرداشتن اهمیت منابع دیگر انرژی اولیه ابراز می‌شود.



تابلوی ۱۳. رآکتور هسته‌ای با آب جوش، Idaho Falls.



تابلوی ۱۴. نیروگاه اتمی Fessenheim (۱۹۷۷).

کتابشناسی

۱. فصل ۱

ARMENGAUD (J.), *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, 3 vol., Paris, 1861-1862,
AUGUSTIN-NORMAND (P.), *La genèse de l'hélice propulsive*, Paris, 1962 (Académie de marine. Communications et mémoires).
— *Les origines des chaudières à circulation accélérée* (1825-1885), Paris, 1929 (extrait de la *Revue maritime*).
BARJOT (R.), Les chemins de fer, dans *La locomotion moderne* (ouvrage collectif), Paris, 1951, p. 233.
BRILLIE (H.), La marine de commerce de 1880 à 1930, *Génie Civil 1880-1930* (numéro spécial du cinquantenaire), p. 55.
BRYANT (L.), The role of thermodynamics in the evolution of heat engines », *Technology and Culture*, 14, 1973, n° 2, 1re partie, p. 162.
CARDWELL (D. S. L.), *From Watt to Clausius*. The rise of thermodynamics in the early industrial age. Londres, 1971. — Compte rendu : J. PAYEN, *British Journal of History of Science*, 1974, pp. 171-175.
—, HILLS (T. L.), Thermodynamics and practical engineering in the nineteenth century, dans : *History of Technology* (recueil annuel édité par A. Rupert, Hall et Norman Smith), I, Londres, 1976, pp. 1-20.
CHAPELON (A.), *La locomotive à vapeur*, Paris, 1938.
DAUMAS (M.), Les mécaniciens autodidactes français et l'acquisition des techniques britanniques, *L'acquisition des techniques par les pays non initiateurs* (Colloque international CNRS n° 538, Pont-à-Mousson, 1970), Paris, 1973, pp. 301-334.
DEMOULIN (M.), *Traité pratique de la construction des machines à vapeur fixes et marines. Résumé des connaissances actuellement acquises sur les machines à vapeur*, Paris, 1895.
DICKINSON (H.-W.), *A short history of the steam-engine*, Cambridge, 1939.
Evolution des grandes centrales thermiques, *Sciences et Industrie*, n° hors-série (42 *bis*), Paris, 1938.
FRANÇOIS (Ch.), Cinquante années de construction navale militaire, *Génie Civil 1880-1930*, p. 45.
HART (G.), Note sur le développement de l'application des turbines à vapeur à la propulsion des navires, *Mémoires de la Société des ingénieurs civils de France*, 1904-1, pp. 56-117.
— Les turbines à vapeur, *Ibid.*, pp. 750-785.
ISHIGAI (S.), Intrinsic law of development of boiler. XIVth. International congress of the history of science, Tokyo-Kyoto, 1974. *Abstracts of Papers*, p. 25 (Science Council of Japan, 1974).
KASTLER (A.), L'œuvre scientifique de Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890). *Revue des sciences*, 65, 1958, pp. 277-297.
LE MASSON (H.), La Marine, dans *La locomotion moderne*, Paris, 1951, p. 7.
LORAÏN (P.), Les chaudières à vapeur, *Cinquante ans de perfectionnement technique*, Paris, 1952, p. 40.
MALLET (A.), Evolution pratique de la machine à vapeur, *Mémoires de la Société des ingénieurs civils de France*, 1908-2, pp. 235-382, 387-538 ; 1910-2, pp. 127-223, 227-329.
MONTEIL (C.), L'évolution des machines thermiques de 1880 à 1930, *Génie Civil 1880-1930*, p. 175.
PAYEN (J.), La technologie des machines à vapeur en France de 1800 à 1850, *L'acquisition des techniques par les pays non initiateurs*, Paris, 1973, pp. 377-406.
POWLES (H.-H.-P.), *Steam boilers. Their history and development*, Londres, 1905.
REDONDI (P.), Sadi Carnot et la recherche technologique en France de 1825 à 1850. Présentation d'un travail de recherche. *Revue d'histoire des sciences*, XXIX, n° 3, juillet 1976, pp. 243-259.
SABOURET (V.), Les chemins de fer depuis cinquante ans, *Génie Civil*, *1880-1930*, p. 63.
SAUVAGE (E.), *La machine locomotive*. Manuel pratique donnant la description des organes et du

fonctionnement de la locomotive, à l'usage des mécaniciens et des chauffeurs, 4e éditio
Paris, 1904.
— *Production, condensation de la vapeur*, Paris, 1923.
SEDILLE (M.), *Progrès de la construction des turbines à vapeur depuis dix ans*, Bruxelles, 19
(extrait du *Bulletin de la Société belge des électriciens*, 72, 1956, n° 2).
SPRATT (H.-Ph.), The marine steam engine, dans SINGER, *History of technology*, V, 1958, p. 14
STOWERS (A.), The stationary steam engine, *Ibid.*, p. 124.
THROP (A.), Some notes on the history of the uniflow engine, *Transactions of the Newcom*
society, XLIII, 1970-71, pp. 19-39.
WATKINS (G.), Steam-power, an illustrated guide, *Industrial archaeology*, IV-2, 1967, pp. 81-11
WITZ (A.), *La machine à vapeur*, 3e éd. revue et augmentée, Paris, 1913.

صلهای ۲ و ۳

ARMENGAUD, REY (J.), HART (G.), LETOMBE (L.), BOCHET (A.), SEKUTOWICZ (L.
STODOLA (A.), DECHAMP (J.), Discussions sur les turbines à gaz, *Bulletin de la société d*
Ingénieurs civils, 1900, pp. 754-820.
BRAUN (W. von), ORDWAY (F. I,), *L'Histoire mondiale de l'astronautique*, Paris, 1968.
BUCHI (Alfred J.), *Exhaust turbocharging of internal combustion engines. Its origin, evolutio*
present state of development and future potentialities, Philadelphie, 1953.
CHALKLEY (A. P.), *Les moteurs diesel type fixe et type marine*, Paris, 1919.
Chronik der Mercedes-Benz Fahrzeuge und Motoren, Stuttgart 1956.
CLERK (D.), *The gaz oil engine*, Londres, 1904.
CUMINS (Lyle), *Internal Fire, the internal combustion engine 1673-1900*, Portland, Oregon, 197
DIESEL (E.), *Diesel : das Mensch, das Werk, das Schicksal*, Stuttgart, 1948.
—, GOLDBECK (G.), SCHILDBERGER (F.), *Vom engines zum Auto*, Stuttgart, 1957.
DAUMAS (M.), Le brevet du pyréolophore des frères Niepce, *Documents pour l'histoire des tec*
niques, cahier n° 1, pp. 23-31.
DESARCES (H.), *Encyclopédie pratique de mécanique et d'électricité* (3 vol.), Paris, 1965.
EVANS (A.), *The history of the oil engine from the year 1860 to the beginning of the year 193*
Londres, 1930.
FERGUSSON (E.), John Ericsson and the age of the calorie, *United States National Museum Bu*
letin, Washington, Smithsonian Institution, 1961.
GILLE (P.), Beau de Rochas. Les trois mémoires de 1862 sur différentes conditions d'applicatio
de l'énergie, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 2, 1963, pp. 25-42.
GOLDBECK (G.), *Gebändigte Kraft. Die Geschichte der Erfindung des Otto-Motores*, München, 196
—, Nicolas-Auguste Otto, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 1, pp. 34-47.
GULDNER (H.), *Calcul et construction des moteurs à combustion*, Paris, 1905.
HERLEA (Alexandre Ion), *La création, l'évolution technique et l'importance économique d*
moteurs industriels à combustion interne à piston jusqu'en 1914, 1977. Thèse 3e cyc
dactylographiée, Paris, CNAM-EHESS.
History (The) of Rocket Technology. Numéro spécial de *Technology and Culture*, 1963.
HUBERT (H.), *Les moteurs thermiques autres que la machine à vapeur*, Paris, 1892.
Machines motrices et réceptrices, Catalogue du Musée du Conservatoire national des Arts et Métier
Paris, 1952.
MARTINOT-LAGARDE, *Les moteurs d'aviation*, Paris, 1917.
MAGOT-CUVRU (P.), De l'influence du cycle sur le rendement et la pression moyenne de quelque
machines thermiques célèbres, *Journal de la Société des Ingénieurs de l'automobile*, 194
PAYEN (J.), *Les moteurs à combustion interne ; une invention dans les textes*, Paris, 1964.
— Le rôle d'Hugon dans les premières réalisations de moteurs à gaz, *Documents pour l'histoi*
des techniques, cahier n° 2, 1963, pp. 43-80.

— Beau de Rochas ; Etude bibliographique, *Documents pour l'histoire des techniques*, cahier n° 2, 1963, pp. 3-24.
RICHARD (G.), *Les moteurs à gaz*, Paris, 1885.
— *Les nouveaux moteurs à gaz et à pétrole*, Paris, 1892.
— *Les moteurs à gaz et à pétrole* (2 volumes), Paris, 1893, 1894.
SASS (F.), *Geschichte des deutschen Verbrennungsmotorenbaues von 1860 bis 1918*, Berlin, 1962.
SEKUTDWICZ (L.), Les turbines à gaz, *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, 1906, pp. 195-299.
SERRUYS (M.), *L'invention et l'évolution du moteur à explosion depuis un siècle, de Lenoir et Beau de Rochas à nos jours*, Paris, 1962.
— *Contribution française à l'évolution technique des moteurs alternatifs à combustion interne*, Paris, 1949.
Siècle (Le) de l'automobile ; Centenaire du moteur à explosion de Beau de Rochas et Lenoir à nos jours. Catalogue d'exposition, Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris, 1962.
STODOLA (A.), *Turbines à vapeur et à gaz*, Paris, 1925.
SORENSEN (E.), *Motor und Turbine. Wettstreit und Zusammenarbeit*, Munich, 1955 (Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte).
THURSTON (R.), *Mechanical engineering*, Vienne, 1973.
TRESCA (H.), Sur l'invention et l'avenir des machines à gaz combustibles, *Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers*, Paris, 1862.
WITZ (A.), *Les moteurs à gaz* (3 volumes), Paris, 1892, 1895, 1899.
— *Dernière évolution des moteurs à gaz*, Paris, 1910.

فصل ۴

Commissariat à l'Énergie atomique, *Génie atomique. Cours fondamental*, PUF, 1967.
DUVAL (Cl.), *Les nouveaux corps simples*, Paris, PUF, coll. « Que sais-je ? », n° 1005, 1962.
L'énergie atomique, Techniques de l'Ingénieur, Paris (en préparation).
GUÉRON (J.), *L'énergie nucléaire*, Paris, PUF, 1977.
— *Les matériaux nucléaires*, Paris, PUF, 1977.
JURAIN (G.), *L'uranium*, Paris, PUF, 1964.
LEFORT (M.), *Les radiations nucléaires*, Paris, PUF, 3e éd., 1969.
PARREINS (G.), *Les centrales nucléaires*, Paris, PUF, 3e éd., 1974.
Revue générale nucléaire, Paris, depuis 1975.
ROCCHICCIOLI-DELTCHEFF (Cl.), *Les isotopes*, Paris, PUF, 2e éd., 1971.
Syndicat CFDT, *L'électronucléaire en France*, Paris, Seuil, 1975.
THIRIET (L.), *L'énergie nucléaire*, Paris, Dunod-Bordas, 1976.

بخش دوم

۱

حرکت به‌سوی برق صنعتی

در مجلد سوم (صفحهٔ ۵۴۱) دیدیم که نخستین کاربرد فنی جریان برق، یعنی تلگراف، زمانی صورت گرفت که فیزیکدانهای بزرگ نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم، دانش نوین الکترومغناطیس را تدوین می‌کردند. در تلگراف، به کمک مغناطیسهای برقی که در اثر اتصال با جریان ضعیف پیلها برخاسته از اختراع ولتا، ایجاد می‌شدند، انتقال علامتها در سالهای ۱۸۳۰ ـ ۱۸۴۰ ممکن شد.

تلگراف برقی، اساساً فنی همراه با ایجاد نخستین راههای آهن بود؛ خط تلگراف، نه‌تنها، خط‌آهن را «همراهی» می‌کرد بلکه امکانی برای انتقال چاپاری و سریع اطلاعات با حرکت قطارها با بهره‌گیری از گسترش این وسیلهٔ نوین حمل‌ونقل بود و هم‌چون راه‌آهن، دستاوردی بود که از آن پس هرگز رها نشد. تلگراف برقی که از آغاز موجودیت خود بر پایهٔ محکمی از تکنیک ارتباطات و حمل‌ونقل گذاشته شده بود، آیندهٔ مطمئنی در پیش روی داشت.

چنین آغازی در راه‌اندازی برق صنعتی بی‌تاثیر نبود. در حقیقت، صرفاً برای رفع نیازهای مربوط به ساخت وسایل برقی، سیمهای رسانا، نصب تاسیسات، راه‌اندازی و نیز نگاهداری آنها، تکنسین‌های اولیه برق در تقریباً همه کشورهای اروپا و نیز امریکای شمالی همت گماشتند و تنها طی حدود

سی‌سال، دشواریها را از پیش پای برداشتند. نخستین مواد و وسایل الکتریکی، رساناها، عایقها، تیرهای حامل و مجهز به عایقها، کموتاتورها، قطع‌کننده‌های جریان برق و غیره، جهت رفع همین نیازها ساخته شدند. زمانی که دینام اختراع شد، ارسال قطعی برق صنعتی ممکن گردید و کارکنان مورد نیاز برای گوناگون ساختن و بهره‌گیری از این اختراع، مجهز به وسایل کار، به‌سرعت در همه جا سر برزدند.

چنانچه فاصله زیاد بیشر از یک سده را برای تبدیل ماشین بخار به موتور همه‌کاره در نظر آوریم، اهمیت تاریخی برق صنعتی دوره پیش از مرحله راه‌اندازی، بهتر درک خواهد شد. اختراعات آقای وات در داخل جهان تکنیک، که هنوز آمادگی پذیرش موتور حرارتی را نداشت، حدود سه چهارم این سده را در بر می‌گیرد، اما پس از این اختراعات، سی و پنج یا چهل سال باید می‌گذشت تا ماشین بخار به دوران بلوغ خود گام گذارد.

تقریباً سی سال پس از کشف برق القایی بود که موتورهایی که می‌توانستند از هر دو سوی بگردند پدید آمدند و ۱۵ سال دیگر هم باید می‌گذشت تا تقریباً همه پایه‌های این تکنیک نوین گذاشته شوند.

این جریان صنعتی، به‌علت نیازی که احساس می‌شد، رشتهٔ آبکاری و روشن‌سازی خیابانها را، که درگذشته با وسایل ناقصی انجام می‌شد بی‌درنگ دربرگرفت. دینام هم در این محیط فنی دارای سطحی چنین بالا، گام نهاد و گذشته از اینکه اختراع آن مورد پذیرش قرار گرفت، از نظر اقتصادی در وضعی بود که بدون تأخیر به‌کار گرفته شد. کارهای اولیهٔ بسیار گوناگونی که برای تکمیل آن، در طول سی‌سال دنبال شد شرایط لازم برای راه‌اندازی این ابزار و به‌کارگیری صنعتی آن را ایجاد کردند.

پیل بونزن: نیازهای روزافزون به جریان برق، طی دهها سال بوسیله مولدهای برق رفع می‌شد. در مجلد سوم(صفحه ۵۴۴) دیده شد که در ربع نخست سدهٔ نوزدهم، در چه موقعیتی، پیل شیمیایی از آزمایشگاه فیزیکدانها وارد حوضهٔ عمل تکنسین‌ها شد. رشتهٔ آبکاری چند سال پس از آغاز تلگراف، رواج گرفت. دوگروه دیگر کاری نیز برای ساختن مولدهای شیمیایی گوناگون فعالیت داشتند. از یک‌سوی، شیمیدانها و فیزیکدانها برای هرچه گسترده‌تر کردن شمار ترکیبات فلزی الکترودها و محلولهای نمکی الکترولیتها می‌کوشیدند؛ و از سوی دیگر، بعضی از آنها بهتر می‌دیدند که پیلهای قویتری با بروندهی منظم و کار همراه با صرفه اختراع کنند. بدین ترتیب، طی چند دهه همهٔ امکانات بسرعت بررسی شد.

پس از پیل دانیل، دو نوع دیگر در آن زمان شهرت یافتند، که یکی پیل بونزن بود و دیگری پیل لکلانشه. هر دو نوع، رواج یافتند و انواع دیگر آنها به زاویهٔ پژوهشهای آزمایشگاهی رانده شدند.

پیل بونزن که با این اسم شهرت یافت از نخستین پیلهای شیمیایی است که آقای بونزن

ساختمان آن را تحقیق کرده و در سال ۱۸۴۱ ساخته شده است. آقای ویلیام رابرت گراو[1] برای تکمیل پیل دانیل، در جهت کاستن از پلاریزاسیون ـ جمع شدن هیدروژن روی الکترود مسی آن بسیار کوشید. وی از اسید نیتریک برای اکسید کردن هیدروژن بهره گرفت، اما به‌ناگزیر به‌جای مس از پلاتین استفاده کرد، که به‌علت بهای بالای این فلز، هرگونه کاربرد آن غیراقتصادی می‌شد. آقای بونزن به‌جای پلاتین، زغال را به‌کار گرفت که تعویضی با یک جسم ارزان بود. در واقع می‌بایست زغالی با فشردگی کافی و نیز خنثی داشته باشیم که طی زمان دربرابر اسید نیتریک پایدار بماند. بونزن نخست اندیشید که مخلوطی از کک و زغال چوب را در دمای بالا به‌عمل آورد و سرانجام لایه‌ای از زغال بسیار سخت را که داخل قرع دستگاه تقطیر گاز روشنایی را می‌پوشانید، برگزید.

بدین ترتیب، پیل نخستین بونزن، الکترود مثبتی از زغال استوانه‌ای شکل قرع داشت که در اسید نیتریکی که درون ظرف متخلخلی از بدل چینی وجود داشت فرو رفته بود؛ و جملگی در ظرفی شیشه‌ای قرار داشتند؛ الکترودی مدور از ملغمهٔ روی که دور ظرف متخلخل حلقه زده بود در آبی که بوسیلهٔ اسید سولفوریک اسیدی شده بود غوطه می‌خورد.

با تغییراتی که در مایع داده شد، نتایجی که با اسید نیتریک به‌دست آمده بود تکرار شد. بویژه خود بونزن از محلول بیکرومات پتاسیم با موفقیت استفاده کرد. آقای پوگندورف[2] نخستین کسی بود که در سال ۱۸۴۴ بیکرومات را به‌کار برده بود.

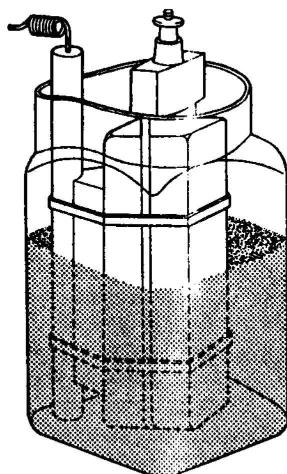
پیل لکلانشه: پیدایش نوع مهم دوم پیل لکلانشه، نتیجهٔ تحقیقاتی است که برای از بین بردن پلاریزاسیون پیل ـ نه به کمک اسید مایع ـ بلکه بوسیلهٔ یک اکسید ـ شده بود. نخست محلولهای نافرجام گوناگونی پیشنهاد شدند، از قبیل محلول اوگوست دو لاریو[3] اهل ژنو، که پروکسید سرب و پلاتین بود. اما سرانجام این آقای ژورژ لکلانشه بود که پیل پروکسید منگنز را به نام خود به ثبت رسانید. وی در سال ۱۸۶۴ فرمول آن را برای نخستین بار به‌دست داد. آقای لکلانشه مهندس راه‌آهن شرق فرانسه بود و درکار پژوهشهای شیمیایی با پیلهایی که در شبکهٔ تلگرافی راههای آهن به‌کارگرفته می‌شدند آشنا شده بود. ساختار این پیل با نوع پیشین تفاوتی نداشت: قطب مثبت آن ورقه‌ای از زغال بود که مخلوطی از دو بخش برابر پروکسید منگنز و زغال خرد شده قرع اطراف آن را گرفته بود. این مجموعهٔ فشرده در ظرف متخلخلی قرار داشت که در محلول کلریدرات‌آمونیم فرو رفته بود. قطب منفی آن میله‌ای از ملغمهٔ روی بود. آقای لکلانشه ظرف پیل خود را به‌شکل مکعب

---

۱. W. R Grove (۱۸۱۱ ـ ۱۸۹۶) فیزیکدان و قاضی انگلیسی، استاد فیزیک در لندن.

۲. Poggendorff، یوهان کریستیان (۱۷۹۶ ـ ۱۸۷۷)؛ فیزیکدان آلمانی.

۳. La Rive (۱۸۰۱ ـ ۱۸۷۳) فیزیکدان سویسی.



شکل ۱.پیل لکلانشه (۱۸۶۴).
میلهٔ زغالی را مخلوطی از پروکسید منگنز و خرده زغال احاطه کرده است. الکترود روی در گوشهٔ چپ پیل قرار دارد.

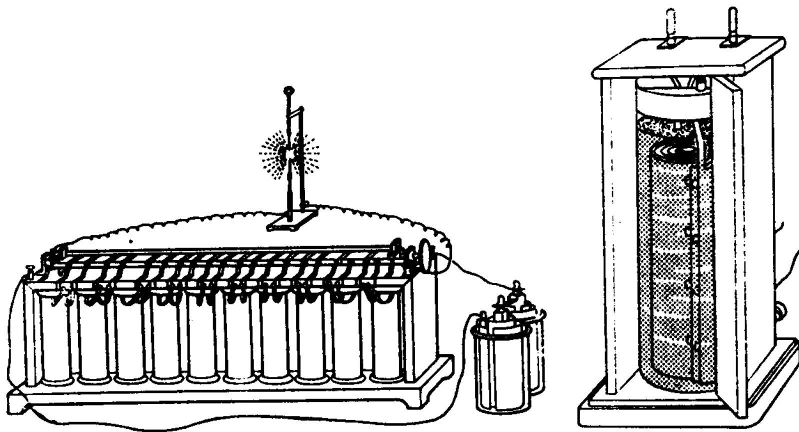
مستطیلی برگزید، گویا برای اینکه از پیل بونزن که استوانه‌ای بود متفاوت باشد (شکل ۱). پیل لکلانشه را در فرانسه، چند سال بعد، وزارت تلگراف رسماً پذیرفت و آن را به تعداد زیاد با مشخصات استاندار ساخت. در کشورهای دیگر، ساخت پیلها در مقیاس صنعتی انجام می‌شد و بتدریج که کاربرد آنها گسترش می‌یافت، همهٔ مؤسسات بزرگ که در تدارک ساختن ماشینهای برقی بودند، مدلهای خاص خود را وارد بازار کردند که با مدلهای مهمی که ذکر آنها رفت تفاوت اساسی نداشتند.

کمی پس از زمانی‌که لکلانشه تولید پیل خود را آغاز کرد، پیل شیمیایی دیگری همراه با «باتری انباره‌ای» پلانته یعنی آکومولاتور ساخته شد.

باتری انباره‌ای: آقای گاستون پلانته در سال ۱۸۵۴، زمانی‌که دستیار آقای ادمون بکرل در کنسرواتور پیشه و هنر شد تنها ۲۰ سال داشت. در این زمان بود که وی برای کارشناسی در فیزیک و بویژه در رشتهٔ مولدهای شیمیایی برق کار را آغاز کرد.

شروع پژوهشهای وی، بررسی کارهای فیزیکدان کم شناخته شده‌ای با نام گوترو[1] بود که در آغاز آن سده، نشان داده بود که اگر قطبهای یک ولتامپرسنج را که در آن تجزیهٔ آب صورت می‌گیرد به یکدیگر وصل کنند، جریان برق در مدار پدید می‌آید. این آزمایش پیش از آقای پلانته چندین بار انجام

1. Gautherot



شکل۲.یکی از خانه‌های آکومولاتور پلانته (۱۸۶۴).
یک گوشهٔ این قوطی باز شده است تا درون آن دیده شود.

شکل۳.آکومولاتور پلانته.
در سمت راست، پیل بونزن برای شارژ کردن آکوmولاتور؛ در بالا، لامپ کوچک قوسی.

گرفته بود و بدون اینکه یک کاربرد عملی برای آن پیشنهاد کنند تفسیر شده بود. در آغاز سال ۱۸۵۹ پلانته خود را وقف بررسی «پلاریزاسیون ولتایی» کرد و چند ماه پس از آن، در مارس ۱۸۶۰، نخستین باتری انباره‌ای خود را در آکادمی فرانسه به نمایش گذاشت. این باتری که ساختمان و مشخصات آکومولاتورهای سربی را داشت سریعاً رواج یافت. در حقیقت، این آقای پلانته بود که کاربرد دو صفحهٔ سربی را، که به طور مارپیچی یکی دور دیگری پیچیده شده و یک نوار پارچه‌ای آنها را از یکدیگر جدا ساخته بود، پیشنهاد کرد. استوانه‌ای که بدین ترتیب ساخته می‌شد در ظرفی شیشه‌ای محتوی آب اسید گذاشته می‌شد. قطبهای این باتری انباره‌ای با قطبهای یک پیل بونزن متصل می‌شد تا پلاریزاسیون صفحات سربی تحریک شود. بدین ترتیب، این پیل، شارژ و در مدار آن جریانی ایجاد می‌شد که با آن می‌توانستند مثلاً یک لامپ کوچک قوسی را، برای اثبات وجود جریان، روشن کنند (شکلهای ۲ و ۳).

آقای پلانته توانست یکی از نقایص پیلها، پلاریزاسیون، را که همه کوششهای فیزیکدانان تا آن زمان در جهت برطرف ساختن آن بود، از بین ببرد. وی پس از موفقیتهای اولیه دست به کار بررسی منظم فلزات شد و اظهار داشت که سرب باتری نیروی برقرانی بسیار بالایی تهیه می‌کند و در عین حال مقاومت داخلی این زوج بسیار کم خواهد بود. علاوه بر این، وی دریافت که چنانچه این کار با یک زوج چندین بار تکرار شود، هر دو مشخصهٔ اصلی بهتر خواهند شد و یک جریان ثانوی قویتر از جریانی که از پیل

اولیه خارج می‌شود به‌دست می‌آید. این تکنیک «تشکیل» الکترودها، هنوز هم اهمیت خود را دارد.

بیست سال پس از کارهای پلانته، فیزیکدان دیگری با نام س.فور[1] برای یافتن وسیله‌ای جهت کاستن مدت «تشکیل» الکترودها، که بسیار طولانی بود، کوشید. وی در سال ۱۸۸۱ ازصفحات دارای اکسیدهای بازگردانیده شده استفاده کرد. سپس با همکاری آقایان سالون[2] و فولمار[3] وسیله‌ای ساخت که از صفحات مشبک با آستری از سرنج ($Pb_۳O_۴$) فشرده تشکیل می‌شد و چند مادهٔ الحاقی سربی بدان افزوده شده بود.

آقای پلانته، پس از چند سال به پژوهشهای خود دربارهٔ آکومولاتورهایش پایان داد و بهترین شکل آن را بررسی کرد و در امکان ردیف کردن آنها به‌شکل باتری، چگونگی شارژ و به‌کارگیری آنها تعمق کرد. آکومولاتورها با وجود سنگینی وزن بزودی یک منبع الکتریسیتهٔ قابل حمل را تشکیل دادند. این وسیله بی‌درنگ نام آکومولاتور (انباره) یافت زیرا چنین می‌نمود که الکتریسیته را انبار می‌کند تا هرگاه بدان نیاز افتد در اختیار گذارد. آن را بدیدهٔ ترانسفورماتور برقی هم نگریسته‌اند. کارهای پلانته چنان کامل بود که به‌هنگام نمایشگاه سال ۱۹۰۰ اظهار نظر شد که علی‌رغم کاربردهای گوناگون این مولد که از آن پس می‌توانست با یک دینام از نو شارژ شود هیچ کمبودی در آن دیده نمی‌شود.

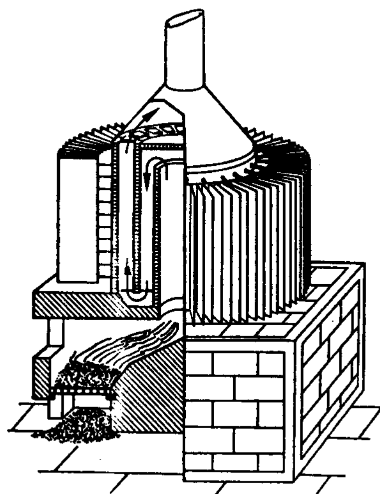
پژوهشهای نابه‌هنگام پیل گازی و ترمو ـ الکتریسیته: تعیین زمان آغاز نابه‌هنگام برخی رشته‌های پژوهشی که کاربرد فنی آنها حدود یک سده بعد ایجاد شد جالب است: از یکسوی، پیل گازی است که آقای ویلیام رابرت گروو فیزیکدان انگلیسی ترکیب شیمیایی و آثار آن را در سالهای ۱۸۴۱ ـ ۱۸۴۶ بررسی کرد. این وسیله نوعی باتری ولتامپرسنجی است که با اتصال زنجیری و لوله‌های باریک آن دارای هیدروژن و اکسیژن بود. آقای گروو ترکیب هیدروژن وکلر را هم بررسی کرد. پیل گازی آقای گروو با اینکه در همهٔ کتابهای مرجع فیزیک درج شده بود تنها، در دههٔ ۱۹۵۰ به‌شکل پیل سوختی ساخته شد.

اثرگرما برق (ترموالکتریک) نیز از دیرباز شناخته شده است. در سال ۱۸۲۱ آقای توماس زبک[4] تولید جریان برق را با گرم کردن محل جوش دو صفحه بیسموت و مس بررسی می‌کرد. فیزیکدانهای متعددی در سالهای بعد این بررسی را ادامه دادند و شماری از آنها مانند بونزن، ادمون بکرل نیز پیلهای ترموالکتریک ساختند، آنان برای این کار چندین زوج فلزی در دسترس را برای گرم کردن یک ردیف جوشکاری متصل ساختند، در حالی که ردیف دیگر را از گرما دیدن مجزا کرده بودند. آزمایشهای بسیار پیشرفته را آقای فرانسوا کلامون[5] انجام داد که در جریان دههٔ ۱۸۷۰ نمونه‌های گوناگونی از پیلها طرح

1. C. Faure 2. Sallon 3. Vollmar

۴. Seebeck، توماس یوهان (۱۷۷۰ ـ ۱۸۳۱)؛ فیزیکدان آلمانی.

5. F. Clamond



شکل ۴.پیل کلامون، از نوع ترموالکتریک (۱۸۷۰).

کرد که آخرین آنها درکتابهای مرجعی فیزیک شرح داده شده است اما در بعضی ازکارگاهها تک‌وتوک به‌کار گرفته شده بود. این پیلها از مفتولهای آهنی و میله‌هایی از آلیاژها روی ـ آنتیموان ساخته شده بودند. این پیلها آرایش ستاره‌ای داشتند که در مرکز این ستاره کانون گرما قرار داشت. گرم کردن پیل بوسیله یک چراغ بونزن گازی انجام می‌گرفت یا در مدلهای بزرگ، اجاقی از زغال گذاشته می‌شد (شکل ۴).

بخوبی دیده می‌شود که از پیل آقای کلامون با وجود طرح هوشمندانهٔ آن هیچ صنعتگری استقبال نکرد. بهای تمام شدهٔ جریان برقی که بدین ترتیب به‌دست می‌آید بسیار بالا بود. وانگهی پیدایش دینامها راه را بر پیشرفت اقتصادی این اختراع سد کرد. نخستین کاربرد صنعتی زوجهای (گرما برقی) را آقای هانری لوشاتلیه در سالهای ۱۸۸۰ برای ساختن تفسجهایی (پیرومترهایی) به‌کار گرفت که دمای کوره‌ها را اندازه می‌گیرند.

بی‌شبهه، پیش از پیدایش ماشینهای بزرگ مغناطیسی برقی و حتی در تمام مدت نوآوری دینامها، پیلها و آکومولاتورها تنها منابع موجود جریان برق و جریانٔ مستقیم آن بودند.

در جنب تلگراف و تقریباً همزمان با آن کاربردهای دیگری برای برق پدید آمدند. با ساختن باتریهایی از پیلهای بزرگ،به کاربرد صنعتی گالوانوپلاستی(صفحه ۷۳۷ را ببینید) دست یافتند و با کمک قوسهای برقی برای روشن‌سازی خیابانها، آزمایشهای اساسی انجام شد. توجه داده

می‌شود که بویژه این دو زمینهٔ کاربرد هستند که نخستین میدانهای استفاده از مولدهای گردان را پدید آوردند. همزمانی این دو زمینه را نباید تصادفی دانست.

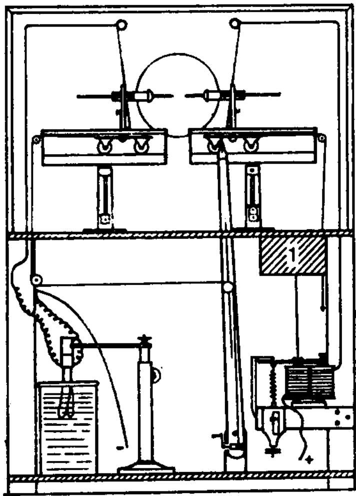
قوس الکتریکی: آزمایشهای نخستین قوس الکتریکی با یک پیل سادهٔ ولتا در سال ۱۸۰۰ بوسیلهٔ هامفری دیوی انجام گرفت. کمی بعد زمانی‌که این فیزیکدان انگلیسی در سال ۱۸۰۸ با سرمایهٔ شخصی خود، پیل بزرگ ۲۰۰۰ واحدی رویال اینستیتیوشن[1] را ساخت کارهای خود را به زمینهٔ الکترو شیمی و قوس الکتریکی بسط داد. او به سال ۱۸۱۰ نخستین «تخم مرغ برقی» را به نمایش گذاشت، که حبابی به‌شکل تخم‌مرغ بود که برای پرهیز از سوختن سریع زغالها در آن، هوای آن را بیرون کشیده بودند، بدین ترتیب قوس الکتریکی چند لحظه‌ای دوام داشت.

نخستین کارهای روشن‌سازی با قوس الکتریکی پس از گذشت سی سال از این تاریخ بود. پایه‌گذار این کار لامپی آقای لئون فوکو بود که در آن زمان بیش از ۲۵ سال نداشت. وی لامپی قوسی طرح کرد که می‌توانست برای یک پروژکتور خورشیدی نقش منبع نوری را ایفا کند. آقای فوکو از این پروژکتور برای انعکاس شکلهای یک کتاب کالبدشناسی استفاده می‌کرد. این الکترودها، دیگر میله‌های زغال چوب نبودند بلکه مفتولهایی تراشیده شده از زغال قرع تقطیر زغال سنگ بودند که بونزن از چندی پیش از آن برای ساختن الکترودهای پیل خود استفاده می‌کرد. از آنجا که فرسایش این زغال به‌طور چشمگیری کم شده بود، نیازی به خلأسازی محیط آن احساس نمی‌شد. فوکو تنها به ساختن وسیله‌ای بسنده کرد که بتدریج که الکترودها مستهلک می‌شدند آنها را با دست به یکدیگر نزدیک می‌ساخت.

با همین وسیله بود که در سال ۱۸۴۴، آقای دلویل[2] که ابزار فیزیکی می‌ساخت، نخستین آزمایش برای روشن‌سازی شهر را در میدان کنکورد پاریس انجام داد. وسیلهٔ وی نوعی لامپ قوسی مجهز به یک نورافکن بود که روی مجسمه‌ای در شهر لیل نصب شده بود.

چندی نگذشت که آزمایشگران متعددی برای خودکار شدن تنظیم میله‌های زغالی کوشیدند. نخستین اختراع برای این تنظیم را آقای تامس رایت انگلیسی به سال ۱۸۴۵ انجام داد و دیگران بسرعت اختراعات دیگری را به ثبت رسانیدند. بین سالهای ۱۸۴۶ ـ ۱۸۵۲ مخترعی که زیاد شناخته شده نبود با نام و. ی. استیت[3] چندین ابزار برای این کار طرح کرد، که در آنها یک سیملوله (سولنویید) با اتصال زنجیری با مدار زغالها مربوط می‌شد. میله‌ای که در این سیم‌لوله بالا و پایین می‌رفت، متناسب با شدت جریان برق، شل و سفت می‌شد. کلاچ، مکانیسمی را فعال می‌ساخت که بوسیله نوعی حرکت ساعتی کشیده می‌شد تا جهت حرکت را معکوس سازد و میله‌های زغال را به‌طور خودکار از یکدیگر دور یا به‌هم نزدیک سازد. آقای استیت رفته رفته

1. Royal institution 2. Deleuil 3. W. E. Staite



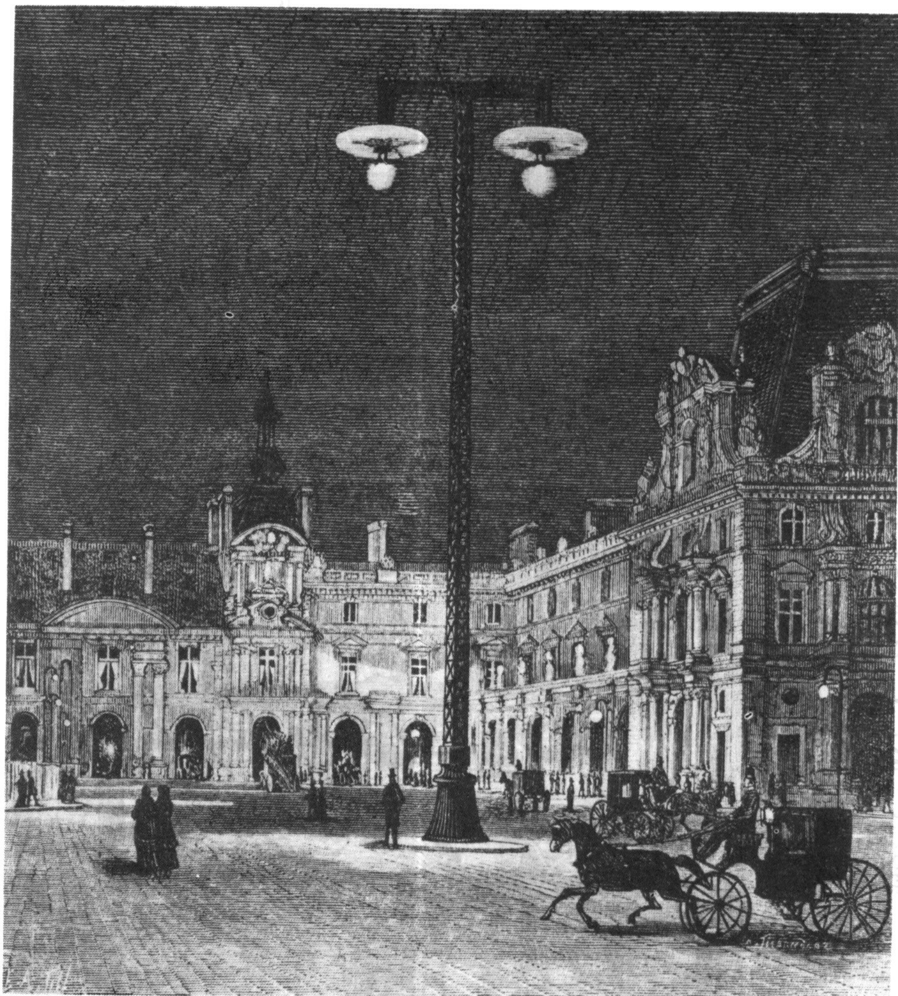
شکل ۵.لامپ قوسی با ناظم فوکو.
هر دو میلهٔ زغالی قوس با سیستم بسیار پیچده‌ای از طنابها، دور و نزدیک می‌شدند. سیستم طنابها به اهرم بزرگ عمودی فرمان می‌دادند و این اهرم بر روروک زغال سمت راست تکیه داشت. چرخدندهٔ ساعتی (۱) را جوش مغناطیس برقی سمت راست، به تواتر بازوبسته می‌کرد. در سمت چپ، یک ظرف پر از سولفات محلول دیده می‌شود تا با فرو رفتن سنجیدهٔ انبرک پلاتینی در آن، جریان برق پیل آرام شود.

دستگاههای خود را ساده‌تر کرد اما گویا ابتکارهای وی رواج زیادی نیافتند.

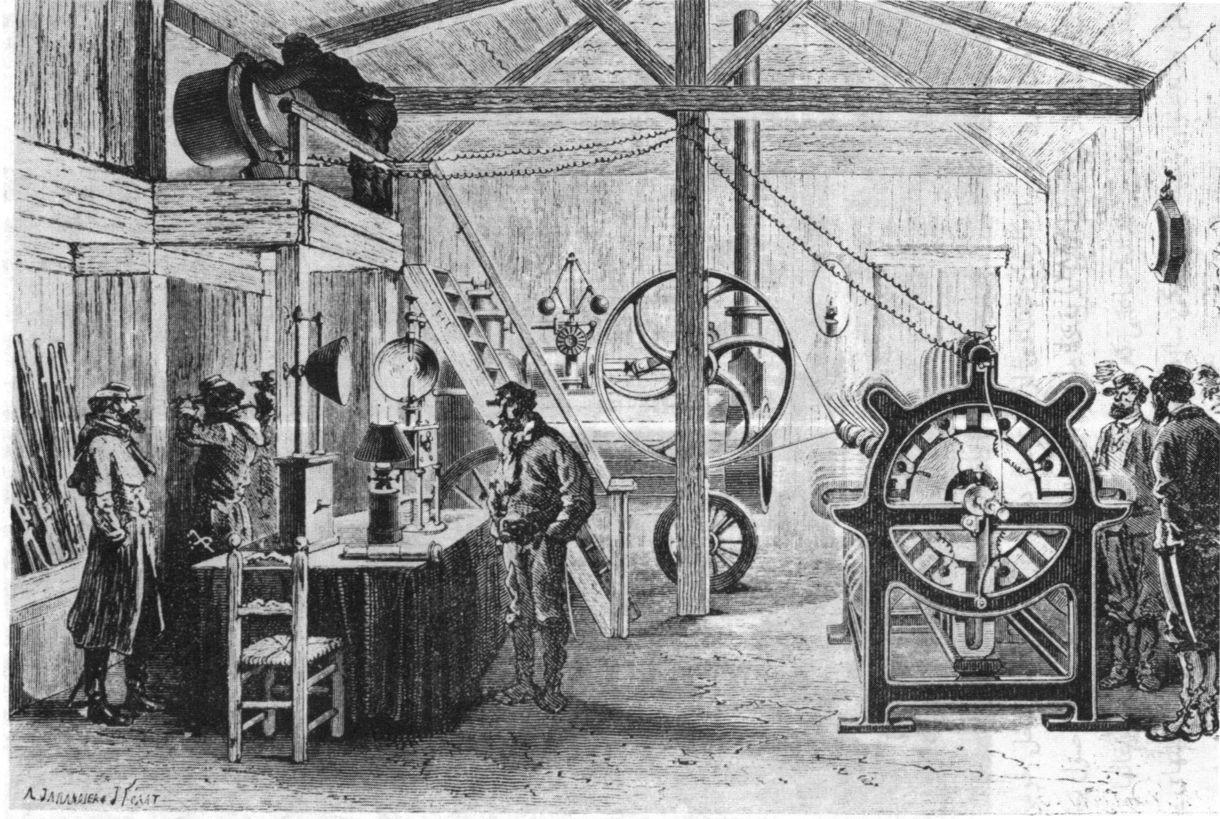
در فرانسه در همین زمان آقای آرشرو[1] از یک (سیملوله) سولنویید برای تنظیم فاصلهٔ میله‌های زغال استفاده می‌کرد. فوکو نیز بنوبهٔ خود دستگاههای نسبتاً پیچیده‌ای را پیشنهاد کرد (شکل ۵) که در سال ۱۸۴۹ به همت آقای ژ. دوبوسک[2]، فیزیکدان و ابزارساز، به ناظمی تبدیل شد که با استفاده از آن در میزانسن اپرای پاریس موفقیت درخشانی به‌دست آورد.

آقای سرن[3] پس از کارهای تعدادی از مخترعان دیگر، در سال ۱۸۵۷ راه‌حل خوبی برای این مسأله پیشنهاد کرد. ناظم آقای سرن، که در سالهای بعد پیاپی تکمیل شد، بر همان اصول پیشینیان وی پایه‌گذاری شده بود: چرخدندهٔ ساعتی که وزنه‌ای آن را می‌گرداند تا جابه‌جا شدن زغالها و مغناطیس برقی را، به‌عنوان وسیلهٔ ناظم ممکن سازد (شکل ۶). در همین زمان نخستین ماشینهای مغناطیسی برقی، که در آینده از آنها سخن خواهیم گفت، به‌کار گرفته شده بودند و روشن‌سازی شهر با لامپهای قوسی، بویژه در کارگاهها، برای نوبت کار شب، بتازگی به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گرفتند.

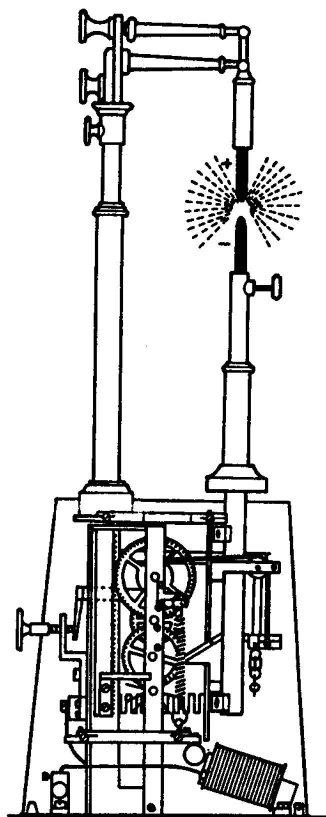
1. Archereau 2. J. Duboscq 3. Serrin



تابلوی ۱۵. روشن‌سازی میدان کاروزل با برق (۱۸۸۲).



تابلوی ۱۶. نورافکن برقی، به‌هنگام محاصرهٔ پاریس (۱۸۷۰).



شکل ۶.لامپ قوسی با ناظم سرن (۱۸۵۶ـ۱۸۵۷).
خود ناظم یک چرخدندهٔ ساعتی است که در پایه دستگاه جاسازی شده است. وزن بازوی حامل زغال بالایی آن را می‌گرداند. مغناطیس برقی اهرم پایینی را متناوباً جذب می‌کند تا بازویی را که حامل زغال پایین است بالا ببرد.

نخستین کاربردهای این لامپها به کمک پیلهای بونزن در موزهٔ لوور و پل نتردام و در کارگاه باراندازهای ناپلئون و در پایان نمایشگاه سال ۱۸۵۵ در مراسم تزیین پاله دو لندوستری[1] برای توزیع پاداشها بوده است.

در سال ۱۸۵۹، وسیلهٔ سرن که از یک‌ماشین مغناطیسی الکتریکی آلیانس[2] تغذیه می‌شد برای روشن‌سازی فانوس دریایی مورد آزمایش قرار گرفت. در سال ۱۸۶۵ پس از چند سال آزمایش

1. Palais de l'industrie 2. Alliance

هر دو فانوس دماغه اِو[1] برای همیشه با ناظم سرن مجهز شدند در سال ۱۸۶۲ فانوسهای دریایی انگلستان نیز با لامپهای قوسی که یک ماشین هولمز آنها را تغذیه می‌کرد روشن شدند. اما تا سال ۱۸۸۰ این روش روشن‌سازی فانوسها با کندی بسیار رواج می‌یافت. در این تاریخ بر روی هم ۱۱ فانوس با قوس برقی روشن بودند؛ اما از این پس این روش بسرعت متداول شد.

در مورد روشن‌سازی خیابانها باید گفت که آغاز مبهمی دارد. در سالهای ۶۰ تنها به‌طور پراکنده از این روش استفاده شده بود و روشن‌سازی خانه‌ها، باغها یا محلهای پذیرایی رسمی و تشریفاتی با لامپهای برقی بود.

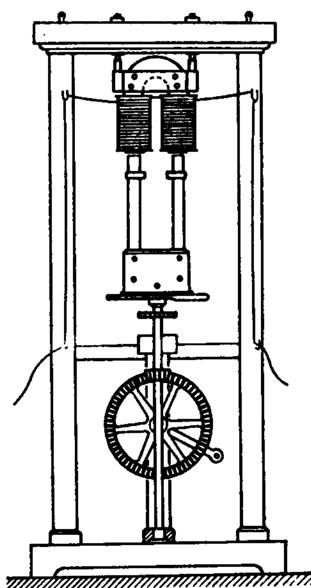
روشن‌سازی با گاز در این زمان رواج کلی داشت زیرا با این شکل و با این نوع مولد، روشن‌سازی با برق نمی‌توانست برای ارائه سرویسی منظم با گاز رقابت کند. در واقع مولدی برای لامپ قوسی لازم بود و مولدها تنها به توسط ماشینهای بخار کار می‌کردند. حتی با پیوست این دیگهای بخار روی چندین مولد، بهای تمام شدهٔ برق برای اینکه بتوان تأسیسات دائم داشت بسیار زیاد است و فضای زیادی که اشغال می‌شد مانع استفادهٔ خصوصی از این تأسیسات بود.

تنها سخنی که می‌ماند این است شدت نور برق مردم آن زمان را تحت تأثیر قرار داد و چند دستگاهی که طی بیست سال ساخته شدند راه پیشرفت سریع این روش روشن‌سازی را به محض در اختیار داشتن دینام، هموار ساختند.

مولدهای مغناطیسی برقی آزمایشگاهی: ماشینهای بزرگ مغناطیسی برقی، در واقع برای تغذیهٔ لامپهای قوسی ساخته شدند. پیش از ساخت آنها یک رشتهٔ تمام از ماشینهای کوچک دستی بمحض آشنایی با پدیدهٔ القا، در سالهای ۱۸۳۰ـ۱۸۳۱ به برکت کارهای فاراده ساخته شده بودند. فاراده به سال ۱۸۳۱ قوانین القای الکترو مغناطیسی را تنظیم کرد. این قوانین، شمار زیادی از آزمایشگران و سازندگان را برای ساخت مولدهای جریان با آهنرباهای دائمی به‌عنوان القاگر و سیم‌پیچهای دارای هسته به عنوان القاگیر ترغیب کرد.

نخستین کس از این عده آقای ایپولیت پیکسی، سازندهٔ ابزارهای فیزیکی در پاریس بود. فاراده مشاهده کرده بود که چنانچه دو پیچک متمایز از سیمی هادی روی حلقه‌ای از آهن نرم گذاشته شوند، اگر جریان پیل در یک پیچک قطع یا برقرار شود جریانهای ناپایداری در پیچک دیگر ایجاد می‌شود. بعدها وی در جریان یک آزمایش خود متوجه پدیدهٔ القا شد. وی اظهار داشت که اگر آهنربایی را در امتداد محور یک سولنویید (سیملوله) حرکت دهند جریانی در سولنویید ایجاد می‌شود جهت این جریان برحسب اینکه آهنربا به سولنویید نزدیک یا از آن دور شود تغییر می‌کند.

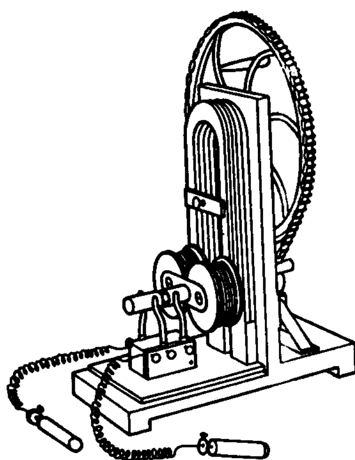
۱. Héve: دماغه‌ای در سن‌ـماریتیم که در شمال مصب ‌رودخانهٔ سن است.



شکل ۷.دستگاه الکترومغناطیسی پیکسی (۱۸۳۳).
در بالا، مغناطیسهای برقی ثابت که بالای دو میله هستند با قاعدهٔ خود تشکیل آهنربایی را می‌دهند که حول یک محور عمودی می‌گردند.

آقای پیکسی با راهنمایی آمپر ماشینی ساخت که دارای دو سولنویید (سیملوله) بود که میله‌هایی از آهن نرم، که شبکه‌ای آهنی آنها را به یکدیگر متصل می‌کرد، از میان آنها می‌گذشت. در زیر این وسیله یک آهنربای نعل اسبی طوری گذاشته می‌شد که هر کدام از قطبهای آن دربرابر دو شاخ میله‌های آهن نرم قرار بگیرند. سیستمی از چرخدنده امکان می‌داد که آن آهنربا حول محور عمودی خود بگردد. بدین ترتیب، حرکت آهنربا نسبت به سیملوله‌ها، که مقر جریانهای متناوب بودند ممکن می‌شد (شکل ۷).

در آن زمان فکر نمی‌کرد که یک جریان متناوب بتواند به‌کار گرفته شود زیرا تنها منبع جریانی که آنها می‌شناختند پیل شیمیایی بود. پیکسی بر اثر اشارات آمپر کموتاتوری طرح کرد که قطبهای ماشین را به تناوب با سیم هادی مدار بیرونی متصل می‌ساخت. بنابراین، از همان آغاز، ساخت سه قطعهٔ اصلی ماشینهای گردان شناخته شدند: القاگر، القاگیر، کموتاتور.



شکل ۸.دستگاه الکترو مغناطیسی کلارک.

مدتی بیش از سی سال، ماشینهای گوناگونی که ساخته شدند، شکل و آرایش هرکدام، با دیگری تفاوت زیاد داشت، اما جالب است که القاگر همیشه از یک یا چند آهنربای دائم بود.

نخستین نوع متفاوت در سال ۱۸۳۳ به توسط یک انگلیسی غیر حرفه‌ای با نام ویلیام ریچتی ساخته شد. وی اندیشیده بود که آهنربای نعل اسبی را در پایین ماشین قرار دهد و قطبها به‌سوی بالا هدایت شوند. قرقره‌ها در بالا میان دو دیسک موازی بسته می‌شدند و حول محور افقی خود می‌گردیدند. قرقره‌ها متوالیاً از میان قطبهای آهنربا می‌گذشتند.

در همان سال یک سازندهٔ امریکایی ابزار با نام جوزف سکستون نوع دیگری از ماشین با القاگیر گردان طرح کرد. دو جفت قرقره دربرابر قطبهای آهنربایی که به‌طور افقی گذاشته شده بود می‌گردیدند. این قرقره‌ها توسط بازویی که حرکت آن را یک تسمه و فلکه به یک محور گردش افقی انتقال می‌داد، جابه‌جا می‌شدند.

کمی بعد در سال ۱۸۵۵ یک انگلیسی با نام ادوارد کلارک ابزار سکستون را بدین ترتیب تغییر داد که آهنربایی را که روی صفحه‌ای بسته شده بود عمودی قرار داد و یک جفت قرقره را دربرابر قطبهای آن می‌گرداند. قرقره‌ها روی محور افقی قرار داشتند و روی این محور کموتاتوری که با کموتاتور آمپر ـ پیکسی تفاوت بسیار داشت گذاشته شده بود (شکل ۸). دستگاه آقای کلارک مدت زیادی به‌عنوان یک دستگاه نمایشی آزمایشگاه‌ها، شهرت فراوان داشت.

القاگیر متحرک کلارک الگویی برای دستگاههای گوناگون به‌اصطلاح «دیسکی» شد. در این دستگاهها سیستمی از قرقره‌ها میان دو صفحهٔ مجهز به آهنرباهای دائم یا برقی می‌گردید. فیزیکدانهای متعددی برای بهتر کردن جزییات آن کوشیدند که یکی از آنها به نام پولفرماخر[1] گویا نخستین کسی بود که به سال ۱۸۴۹ به‌جای هسته‌های قرقره از مجموعهٔ ورقهای آهنی استفاده کرد.

آقای چارلز ویتستون در سال ۱۸۴۱ ماشینی ساخت که تنها می‌توان آن را کپی ماشین کلارک دانست. این ماشین پنج القاگر با فرجهٔ ۳۶ درجه داشت که روی دیسکی ثابت شده بودند و بین قطبهای شش آهنربای دائم می‌گردیدند. کولکتور (گردآور)ها به‌طور زنجیری اتصال داشتند و این امر سبب می‌شد که در هر لحظه نیروی برقرانی کل برابر با جمع پنج نیرویی باشد که ماکزیمم آنها در فرجهٔ ۳۶ درجه است. این ترتیب نزدیک شدن به جریان مستقیم را ممکن می‌ساخت. آقای ویتستون بدین ترتیب دامنهٔ موج‌سازی را کاهش می‌داد و اهمیت فاز را که از آن پس نیز مدتی نزدیک به نیم سده به‌کار گرفته نشد، روشن ساخت.

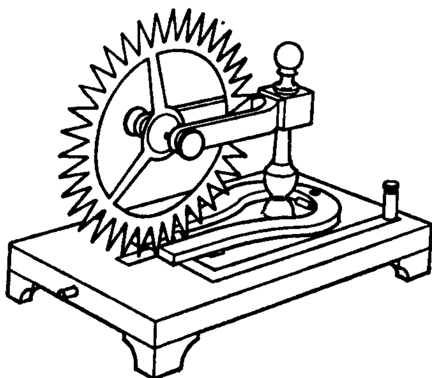
ویتستون همچنین حدود سال ۱۸۴۵ به‌جای آهنرباهای دائم از مغناطیسهای برقی تحریک شده بوسیله جریان یک ردیف پیل استفاده کرد. اما این نوآوری نیز تا ۲۰ سال بعد به‌کار گرفته نشد.

در همان اوان فیزیکدانی امریکایی با نام چارلز پیج[2] در سالهای ۱۸۳۵ ـ ۱۸۴۰ کوشید تا از آرایش تازه‌ای استفاده کند اما اندیشهٔ وی دنبال نشد. یکی از طرحهایی که در بعضی از ماشینهایش به‌کار گرفت ثابت نگاهداشتن آهنربا و قرقره‌ها اما تغییر دادن شدت میدان مغناطیسی با حرکت خطی میلهٔ آهن نرم بود که به‌عنوان هستهٔ قرقره‌ها عمل می‌کرد. در آرایش دیگری آهنربا به‌طور افقی ثابت نگاهداشته شده بود و شاخهای آن از درون قرقره‌ها رد می‌شدند. آرماتوری از آهن نرم را بازو و چرخدنده‌ای دربرابر قطبهای آهنربا می‌گردانیدند.

این نوع مولد با «آهن گردان» پس از گذشت سالهای زیاد، بدون اینکه چیزی از آقای پیج اقتباس کرده باشد در طرح بعضی از مولدهای جریان متناوب، بویژه مولدهای دارای بسامد زیاد، احیا شد.

کوششهای نابه‌هنگام در موتورهای برقی: هرچند که اصل برگشت‌پذیری وظایف یک ماشین مغناطیسی برقی شناخته شده‌بود، باز جالب است بدانیم که مخترعان مولدها درپی این نبودند که این وسیله بتواند با تغذیه از جریان یک پیل، همچون موتوری کار کند. گویا تنها آقای چارلز پیج بدین هدف خیلی نزدیک شده بود، اما انواع موتورهای وی تفاوت زیادی با انواع مولدهای او داشتند.

1. Pulvermacher 2. Ch. Page

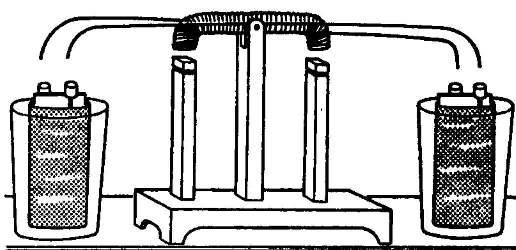


شکل ۹.چرخ بارلو.
نوکهای این چرخ؛ با سطح فنجانی جیوه‌دار که بین قطبهای یک مغناطیس گذاشته شده است، تماس می‌یابند. جیوه و محور چرخ اتصال الکتریکی را برقرار می‌سازند.

از زمان آزمایش آقای پتر بارلو در سال ۱۸۲۲ روی گردش یک سیم هادی در میدان مغناطیسی ـ آزمایشی که پیش از آزمایشهای فاراده انجام گرفته بود ـ نخستین روتور برقی را موتور بارلو می‌دانند. قطعهٔ متحرک این موتور، دیسک دندانه‌دار ساده‌ای است که نقش سیم هادی را دارد نه یک آهنربای برقی. این چرخ، محل گشتاور پیچشی (کوپل) است که همواره در یک جهت عمل می‌کند (شکل ۹). بیش از نیم سده باید بگذرد تا موتورهای برقی صنعتی با جریان مستقیم، بوسیلهٔ رساناهایی که جریان برق را انتقال می‌دهند و در میدانهای مغناطیسی می‌گردند، ساخته شوند.

اما سازندگان نخستین موتورهای برقی از نمونهٔ بارلو تقلید نکردند. آنها درپی بهره‌گیری از نیروهای نسبتاً مهمی برآمدند که بوسیلهٔ مغناطیسهای برقی جرمهای مغناطیسی را جذب کند یا بین آنها نیروی جاذبه و دافعه ایجاد نماید. اما، علاوه بر اینها، بیشتر مخترعان نتوانستند از تصویر ماشین بخار و حرکت متناوب آن، که کلاسیک شده بود آزاد شوند. آنها از بهره‌گیری از آثار گردش پیوسته چشم پوشاندند و تنها درپی تعویض پیستونها با مغناطیسهای برقی برآمدند، درحالی‌که سیستم سنگین بازوولنگ را نگاهداشتند.

باید گفت که همان نخستین موتور جوزف هنری در سال ۱۸۳۱ می‌توانست پیش‌نمونهٔ یک موتور برقمغناطیسی تلقی شود که یک قرقرهٔ طویل مغناطیس برقی داشت که حرکتی نوسانی روی



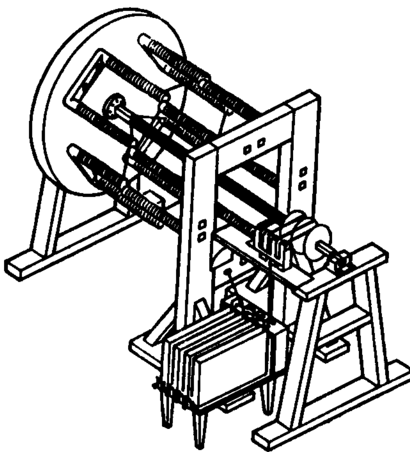
شکل ۱۰.موتور هنری (۱۸۳۱).
نوسانهای عمودی متناوباً با پیلهایی که در دو سوی دستگاه گذاشته شده‌اند، اتصال برقی را برقرار کنند.

قطبهای یک آهنربای دائم انجام می‌داد (شکل ۱۰). کوششهای دیگری در سالهای بعد در ایتالیا، انگلستان و امریکا دیده شد. گویا این ریتچی انگلیسی بود که به‌عنوان نخستین کس در سال ۱۸۳۳ توانست حرکت دورانی مغناطیسی افقی را، که قرقره‌هایی از یک رسانا آن را دربرگرفته بودند، ایجاد کند. مخترعان دیگری از زمرهٔ ویلیام استورجن[1] در ۱۸۳۳، ت. ادموندسن[2] در ۱۸۳۴، فرنیس واتکینز[3] در ۱۸۳۵ توانستند مجموعهٔ میله‌های مغناطیسی شده را که به‌طور ضربدری یا ستاره‌ای آرایش یافته بودند در برابر قطبهای مغناطیسهای برقی به گردش درآوردند. همهٔ این وسایل می‌توانستند از طریق یک فلکه، حداکثر بارهای سبکی را بلند کنند.

آزمایشی که در این زمان سرنوشت‌ساز شد به آقای هرمان‌فون یاکوبی در سال ۱۸۳۸ در سن پترزبورگ مربوط می‌شد. وی موتور برقی اختراعی خود را بر روی قایقی که دوازده نفر سرنشین داشت، نصب کرد. در سال ۱۸۳۴ نیز آقای یاکوبی موتوری را ساخت و آزمایش کرد که القاگر و القاگیر آن مغناطیسهای برقی نعل اسبی بودند. یک باتری چهار خانه‌ای را به‌طور افقی روی تکیه‌گاهی عمودی چنان نصب کرده بود که هشت قطب این خانه‌ها، تاجی را تشکیل می‌دادند و تاج مشابهی که بر روی دیسک متحرکی حول محور افقی می‌گردید رو در روی آن قرار داشت (شکل ۱۱). کوموتاتوری با چهار چرخدنده، جریان پیلی را که تحریک‌کنندهٔ مغناطیسهای برقی متحرک بود، در زمانی‌که این مغناطیسها رودرروی مغناطیسهای ثابت قرار می‌گرفتند، معکوس می‌ساخت. بدین ترتیب، یک نیروی دافعه تشکیل می‌شد که نیروی جاذبه‌ای بر اثر کوپل بعدی نیروها به دنبال داشت؛ در نتیجه، محور موتور می‌گردید.

یاکوبی با موتوری از همین نوع، اما کاملترـ در پرتو کمک مالی تزارـ توانست قایق خود را

1. W.Sturgeon 2. Edmondson 3. F.Watkins



شکل ۱۱.نمایهٔ موتور برقی یاکوبی (۱۸۳۴).
بخش متحرک این موتور، دیسک سمت چپ تصویر است که حامل چهار مغناطیس برقی است.

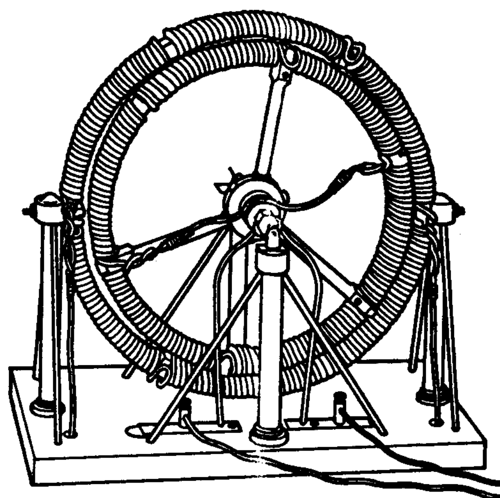
مدت سه ساعت روی رودخانهٔ نِوا حرکت دهد. منبع برق آن یک باتری دارای ۱۲۰ پیل گروو بود. سرعت متوسط این قایق ۳٫۶ کیلومتر در ساعت بود.

یاکوبی با اندازه‌گیری شدت جریانی که از پیلها گرفته می‌شد اظهار داشت که در سرعت حداکثر، این شدت به نصف مقدار لحظهٔ شروع حرکت کاهش می‌یابد. اشکال کار از اثر نیروی برق وارانی بود که از جابه‌جایی قرقره‌ها در میدان مغناطیسهای برقی ثابت، ایجاد می‌شد. این موتور برگشت‌پذیر بود اما یاکوبی توضیح روشنی برای آن نداده بود. برای اینکه این پدیده بخوبی شناخته شود باید چشم به راه کارهای آنتونیو پاچینوتی[1] (که آن هم گویا نادیده گرفته شده‌است) و بررسیهای ایپولیت فونتن روی دینام گرام به سال ۱۸۷۲ بود.

آزمایشهای یاکوبی برای تأسیس ناوگان کوچکی با موتورهای بوسیلهٔ برقی روی رودخانهٔ نِوا، پس از این نمایش دنبال نشد زیرابهای تمام شدهٔ جریانی که بوسیلهٔ پیل ایجاد می‌شد دربرابر کاری که از این ناوگان انتظار می‌رفت بسیار گزاف بود. اما آشکار بود که استفاده از همین منابع جریان برای گالوانوپلاستی (آبکاری، فلزاندایی) همیشه موفقیت دارد زیرا ارزش قطعات آب‌طلاکاری شده‌ای که با این وسیله تهیه می‌شدند در بازار همیشه بالا بود.

طی سالهای ۱۸۳۰ ـ ۱۸۴۰ اشخاص متعددی انواعی از موتورها با ساختمانهای گوناگون

۱. A.Pacinotti (۱۸۴۱ ـ ۱۹۱۲): فیزیکدان و مخترع ایتالیایی.



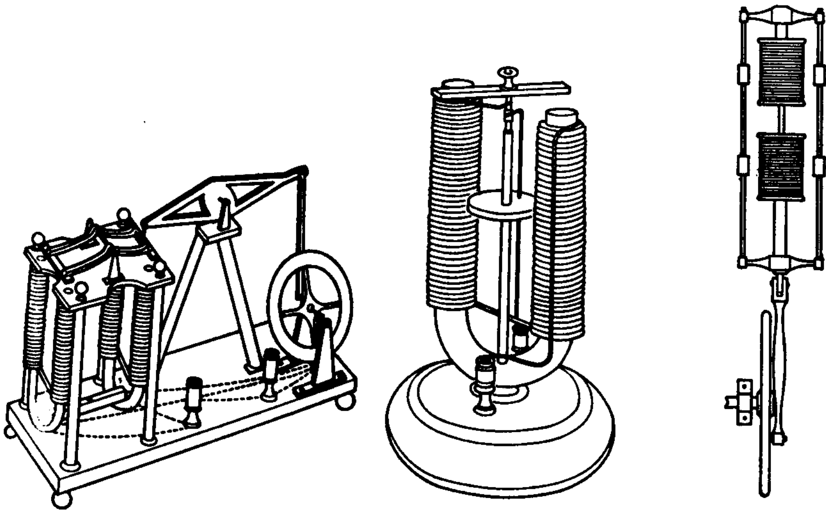
شکل ۱۲.موتور برقی الیاس (۱۸۴۲). حلقهٔ بیرونی ثابت است؛ حلقه درونی حول محور خود می‌گردد.

طرح کردند. اما همگی از نیروی جاذبه و دافعهٔ میله‌های آهنربا شده بوسیلهٔ مغناطیسهای برقی بهره گرفته بودند؛ در مدار برقی آنها جریانی که پیلها ایجاد می‌کردند با هر فاز معکوس می‌شد. از میان نام‌هائی که به یک یا چند تا از این اختراعات عقیم مربوط می‌شوند می‌توان از تامس دونپورت[1]، جیمز پرسکوت ژول و آقای پ. الیاس[2] هلندی نام برد

در موتور ساخت آقای الیاس دو ردیف سیم‌پیچ روی دو حلقهٔ هم مرکز از آهن نرم گذاشته شده‌بود که یکی ثابت و دیگری متحرک بود. حلقهٔ ثابت، شش قرقره داشت که یک در میان در جهات مخالف یکدیگر پیچیده شده بودند و بنابراین شش جفت قطب مغناطیسی در آن بود. حلقهٔ متحرک نیز همین وضع را داشت. کموتاتوری جهت جریان را در بوبینهای حلقهٔ متحرک، زمانی‌که این حلقه به‌اندازهٔ یک ششم محیط خود گردیده بود، معکوس می‌کرد (شکل ۱۲). این سیستم نیز برگشت‌پذیر است، اما مانند موتور یاکوبی، جزئیات مکانیسم مهم آن روشن نیست.

می‌بایست بویژه از آقای پیج نام ببریم که نخستین مخترعی بود که از مغناطیسهای برقی استفاده کرد که هسته‌هایی را که عمیقاً فرو می‌رفتند جذب می‌کردند. در یکی از نمونه‌ها، هسته‌ها روی یک محور عمودی کار گذاشته شده بودند که از میان سولنوییدهایی که از این سر تا آن سر امتداد داشتند، می‌گذشت. این محور روی قابی عمودی، متصل به بازوی یک لنگ، بسته شده‌بود.

1. T.Davenport 2. P.Elias



شکل۱۳.موتور برقی پیج، با هسته‌های فرورونده.

شکل۱۴.موتور برقی پیج، با میلهٔ مغناطیسی دورانی.

شکل۱۵.موتور برقی پیج، با مغناطیس نوساندار.
به شباهت ساختمان این موتور با ماشین بخار شاهنگی توجه کنید.

بر اساس حرکت رفت و برگشتی این قاب، هسته‌ها متناوباً در سولنوبید (سیملوله) مربوطه فرو می‌رفتند (شکل ۱۳).

پیج طی یک دهه نمونه‌های متعددی از موتورهای برقی ساخت. در همهٔ آنها یا حرکت دورانی (شکل ۱۴)، یا حرکت نوسانی یک آهنربا (شکل ۱۵) وجود داشت. در مورد اخیر، چهرهٔ آشنای، ماشین بخار شاهنگی نمایان است. وی حدود سال ۱۸۵۰ توانست موتورهایی بسازد که توان آنها حدود ۸ تا ۲۰ اسب بخار بود و از آنها برای کشیدن یک لوکوموتیو آزمایش شد.

در فرانسه، سازندگان متعددی نظیر آقایان بوربوز[1]، لارمانژا[2]، فرومان نیز درصدد به‌کار گرفتن انرژی برقی برآمدند. بویژه گوستا و فرومان بود که در سالهای ۱۸۴۴ ـ ۱۸۴۸ این امکان را نشان داد. وی تقریباً ده آرایش گوناگون را، که بعضی از آنها اگر هم زیاد کارا نبودند اما اصیل بودند، مورد آزمایش قرار دارد: چون مدلهای وی به اصطلاح برون ـ چرخزادی بودند که در آنها بوبینهای

1. Bourbouze 2. Larmanjeat

مغناطیسی برقی که به‌طور شعاعی قرار گرفته بودند ایجاد یک ستاره می‌کردند، جاذبهٔ آهنرباهای دائم که درون تاجی محیط بر تاج دیگر قرار داشتند قرقره‌ها را وادار به گردش می‌کرد و برای کار معکوس، تاج آهنرباهای دائم متحرک بود و تاج مغناطیسهای برقی ثابت می‌ماند. مدلهای دیگری هم ساخته است که ساختار کلی ماشینهای بخار افقی یا عمودی را تداعی می‌کردند. معلوم شده‌است (مجلد سوم، صفحهٔ ۵۵۹) که موتورهای فرومان از موتورهای کمیاب دارای مغناطیسهای برقی این دوره به‌شمار می‌آیند که به‌طور مؤثری کار می‌کردند. فرومان هم از این موتورها برای هدایت دستگاه تقسیم یا مدرج‌سازی در کارگاههای خود استفاده می‌کرده است.

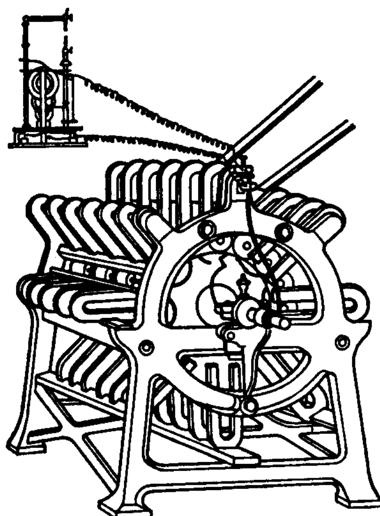
دستگاههای بزرگ نخستین: در فرانسه و انگلستان ساخت دستگاههای بزرگ مغناطیسی برقی بستگی به حل مسألهٔ کاربرد قوس برقی برای روشن‌سازی فانوسهای دریایی داشت. در سال ۱۸۴۱ آقای ایلکینگتن[1] صنعتگر بیرمنگامی برای استفاده از مولدهای با مغناطیسهای برقی به‌جای پیلهای شیمیایی برای آبکاری (فلزاندایی) کوششهایی به‌عمل آورد. اما آزمایشهای وی تا ده سال رضایتبخش نبودند. در همان اوان آقای فردریک ه. هولمز[2] در انگلستان و فلوریز نوله در بلژیک بر آن شدند که برای روشن‌سازی از مگنت استفاده کنند. روش آنها کاملاً با گذشت تفاوت داشت.

آقای نوله، استاد مدرسهٔ نظام بروکسل، در نظر داشت ماشین سنتی آقای سکستن یا کلارک را جهت الکترولیز مقدار زیادی آب تکمیل کند. هیدروژنی که بدین ترتیب به‌دست می‌آمد قرار بود برای روشن‌سازی مشتعل شود. وی بررسیهای خود را در سال ۱۸۴۹ آغاز کرد و در ۱۸۵۳ نخستین اختراع را به ثبت رسانید. ظاهراً نوله باید در همین سال مرده باشد اما یکی از کارگران وی با نام ژوزف وان مالدرن[3] پیگیر کار او شد و آن را موفقانه به انجام رسانید.

کمی شگفت‌آور است که بر پایهٔ طرح نوله، در باب روشن‌سازی یا هیدروژن، در زمانی‌که کار روشن‌سازی با گاز زغال‌سنگ اهمیت یافته بود، یک شرکت سرمایه گذاری برای این کار تشکیل شد و ماشین تازه که به نام شرکت آلیانس خوانده شد لزوماً بوسیله یک ماشین بخار به گردش درآمد. در واقع طرح اصلی بی‌درنگ کنار گذاشته شد و ماشینهای ساخته شده، لامپهای قوسی را مستقیماً روشن می‌کردند.

مولد آلیانس حاوی هیچ نوآوری نبود و صرفاً طرحی را که به اشکال مختلف پیاده شده بود تکرار می‌کرد: آهنرباهای دائم را که به‌طور شعاعی در تاجهای دارای تعداد زیادی قرقره قرار داشتند میان تاجهای ثابت به‌گردش درمی‌آورد. روی دستگاه مالدرن ۱۶ قرقره برای هر تاج متحرک گذاشته شده بود که در برابر قطبهای هشت آهنربای دائم می‌گردیدند (شکل ۱۶). بزرگترین دستگاه از

1. Elkington 2. Holmes 3. Joseph Van Malderen

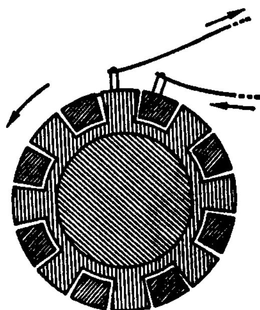


شکل ۱۶.ژنراتور آلیانس.
تاج ثابت آهنرباهایی دائم به‌شکل نعل اسبی دیده می‌شود و نخستین تاج گردان حامل قرقره‌ها تشخیص داده می‌شود. تسمهٔ نقاله به ماشین بخار اتصال دارد مولد یک لامپ قوسی را روشن می‌کند

این نوع دارای شش آرماتور گردان و شش آرماتور ثابت بود که جملگی حول یک محور افقی و یک سکوی چدنی کار گذاشته شده بودند. هُنری که در این دستگاه به‌کار رفته بود مربوط به طرز اتصال سیمهای قرقره‌ها و تشکیلات یک کموتاتور سنگین دارای کولکتور برای فراهم ساختن جریان مستقیم در مدار می‌شد (شکل ۱۷).

پس از چندین بار نمایش روشن‌سازی در حضور مردم پاریس و لندن با یک ناظم سرن، دو دستگاه بزرگ آلیانس در سال ۱۸۶۳، همان‌طورکه در پیش دیدیم، در چراغ دریای دماغهٔ او، در نزدیکی لوهاور گذاشته شدند.

آقای هولمز در همان زمان به نتایج مشابهی رسید. وی در سال ۱۸۵۳ اندیشیده بود که لامپهای قوسی می‌توانند با برق یک دستگاه بزرگ مغناطیسی برقی روشن شوند و سه سال پس از آن امتیاز دستگاهی را به ثبت رسانید که شش دیسک گردان داشت که هر کدام هشت مغناطیس برقی را حمل می‌کرد؛ به‌عبارت دیگر، او شانزده قطب را فعال ساخته بود که با شانزده قطب هشت آهنربای دائم که نقش القاگر را داشتند، مربوط می‌شدند.



شکل ۱۷.جزئیات جابه‌جاگر (کموتاتور) ژنراتور آلیانس.
این قطعه به‌عنوان یکسوکننده جریان عمل می‌کند. شامل دوروتور است که در یک جهت حول یک محور می‌گردند. دندانه‌های یکی از آنها در چاکهای دیگری قرار دارد.

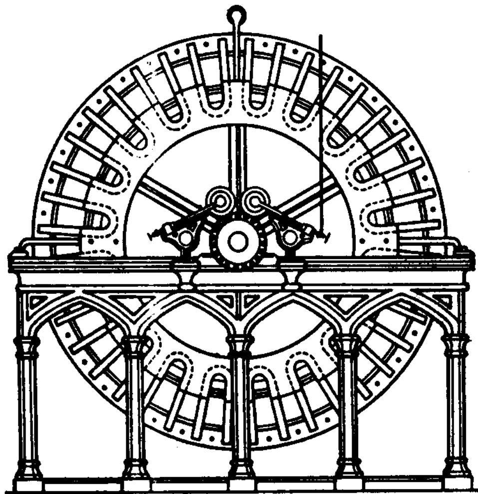
در واقع میان مولد وان مالدرن و مولد هولمز تفاوت چندانی نبود. این مولدها تنها از نظر شکل آهنرباها، سکوی چدنی و نیز آرایش کوموتاتور، یا کولکتور- یکسوکنندهٔ جریان با یکدیگر تفاوت داشتند (شکل ۱۸). با این همه هولمز در سال ۱۸۵۷ به مقامات صلاحیتدار پیشنهاد کرد که از مولد او برای روشن‌سازی چراغ دریایی با ناظمهای قوسی استفاده شود.

وی پس از یک نمایش، نوع دیگری از این دستگاه را طرح کرد که روی آن مغناطیسهای برقی روی سکوهای ثابت و آهنرباهای دائم روی دیسکهای گردان قرار داشتند.

آقای هولمز این دو فرمول را با تغییراتی کوچک روی دستگاههای متعددی پیاده کرد. در سال ۱۸۶۲ چراغ دریایی دوژانس[1] که روی پا دوکاله کارگذاشته شد با برق روشن می‌شد و هولمز تمام آن، از جمله ناظم قوسی آن را با الهام از کار سرن ساخته بود. چنین می‌نماید که این آزمایش نیز مانند آزمایشهای پیش از آن نتیجهٔ رضایتبخشی نداشت. این دستگاه برقی پس از ۱۲ سال کار ناپیوسته، در سال ۱۸۷۴ با یک لامپ روغنی معمولی تعویض شد. اما در فرانسه دستگاههای آلیانس تا مدتها پس از اختراع دینام به‌کار خود ادامه می‌دادند.

این درست است که این دستگاهها طی زمان تغییراتی را متحمل شدند. بویژه تغییراتی که آقای مریتانس[2] در سال ۱۸۷۸ وارد کرد از مکانیسم حلقهٔ گرام- پاچینوتی الهام گرفته بود و آن سیم‌پیچی بود که چند سال پیش از آن اختراع شده بود و بعدها از آن سخن خواهیم گفت. حلقهٔ مریتانس، صاف و هستهٔ آن از ورق نازکی تشکیل شده بود. این حلقه برخلاف حلقه‌های مخترعان

1. Dugeness 2. Méritens

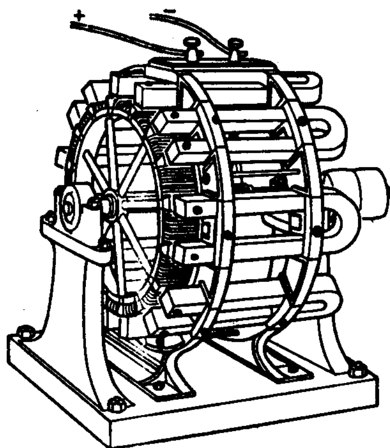


شکل ۱۸.مولد فردریک هـ. هولمز (۱۸۵۸).
در این مدل، آهنرباهای دائم در جهت مخالف آهنرباهای مولد آلیانس گذاشته شده‌اند. در وسط، یکسوکننده جریان از همان نوع است. از دو روتور کوچک تشکیل شده‌اند. میلهٔ عمودی در وسط تصویر به یک ناظم گلوله‌ای (مرکزگریز) وصل شده‌است، و با برگردانیدن تسمه، جای کلکتورها را معین می‌سازد.

دینام صنعتی در تمام طول تاج یکپارچه نبود و به چند قطعه تقسیم شده بود. روی هرکدام از این قطعات، سیم‌پیچ در یک گودی که انتهای تیزی داشت گذاشته شده بود. مریتانس همان‌طورکه گرام پیش از وی عمل کرده بود از آهنرباهای دائم از نوعی که ژامن[1] به‌کار برده بود استفاده کرد، یعنی از ورقهای فولادی چسبیده به‌هم که مجموعاً شکل نعل اسب می‌یافت. این آهنرباها به‌طور شعاعی، مانند دستگاه مالدرن یا مماس با تاج القاگیر گذاشته می‌شدند (شکل ۱۹). استفاده از آهنربای ژامن امکان داد که میدان مغناطیسی بسیار نیرومندتر از میدانهایی معمولی حاصل از میله‌های ستبر، ایجاد شود.

آقای مریتانس بدون درنگ، باز به تأسی از گرام، در محدودهٔ ماشین خود و به کمک دینام خود به گردآوری جریان متناوب پرداخت. برتری این نوع تغذیهٔ دستگاههای ناظم قوسی آشکار بود، گرچه این آشکاری حدود سی سال دیده نمی‌شد. هردو میلهٔ زغالی همزمان و منظماً فرسایش

۱. Jamin، ژول سلستن (۱۸۱۸ ـ ۱۸۸۶): فیزیکدان فرانسوی.



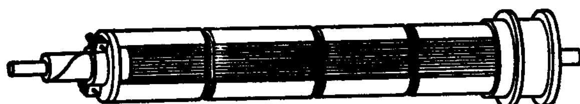
شکل ۱۹.مولد الکترومغناطیسی مریتانس (۱۸۷۸).
آهنرباهای دائم از نوع ژامن تشکیل تاج ثابتی داده‌اند که حلقهٔ با سیم‌پیچ گسسته را به‌طور مماس دربرگرفته است.

داشتند درحالی‌که در صورت تغذیه با جریان مستقیم، تنها یک زغال فرسوده می‌شد و نوک آن از شکل می‌افتاد. آلیانس انواع گوناگونی از دستگاههای مریتانس ساخت که از جملهٔ آنها، مولدهای جریان مستقیم بود که هم برای روشن‌سازی و هم درکارخانه‌ها کاربرد داشتند. این دستگاهها حدود سال ۱۸۹۰ دربرابر دینامها و تناوبگر (آلترناتور)ها واپس نشستند.

راه‌حلهای جزئی به‌سوی دینام: دستگاههای دیگری که در همان اوان یا کمی بعد اختراع شدند تجسم تحولی هستند که پیدایش دینام مرهون آن است.

آقای ورنر فون زیمنس در سال ۱۸۵۶، مگنتی با توان کم را طرح کرد که با دست کار می‌کرد تا زنگ شروع تلگراف را به صدا آورد. زیمنس بر خلاف پیشینیان خود تنها از یک سیملوله (سولنویید) صاف با مارپیچی چهارگوش، مانند مارپیچهای یک گالوانومتر، استفاده کرد. این سیملوله را بین قطبهای آهنربا قرار داد تا حول محور بزرگ خود بگردد. دو شاخ نعل اسبی این آهنربا به توسط «کفشکهای قطبی» فرسوده شده به درون استوانه فرو می‌رفتند تا القاگیر را بپوشانند.

دستگاه قرقره‌ها نیز ویژگیهای جالبی را نمایش می‌داد. هسته‌ای استوانه‌ای از آهن نرم که از درون قرقره‌ها می‌گذشت دو شیار عمیق به‌صورت ضربدری داشت که سیم‌پیچی درگودی آنها کار گذاشته شده بود. این هسته با محور گردش، یکی شده بود.



شکل ۲۰.القاگیر ماکو شکل زیمنس

الگوی زیمنس از نظر طرح یک مدار مغناطیسی بسته، که بین کفشکهای قطبی و القاگیر آن تنها فاصله کمی وجود داشت، جالب است. شکل کشیدهٔ القاگیر نیز، آن بخش از رساناها را که نزدیک قطبها می‌گردیدند بسیار بااهمیت می‌کرد. زیمنس آن را doppple T Anker یا لنگر تیرآهنی می‌نامید و وجه تسمیهٔ آن نمای مقطع عرضی هسته بود. این القاگیر را ماکویی هم می‌نامند زیرا شکل آن ماکوی بافندگی را تداعی می‌کند (شکل ۲۰).

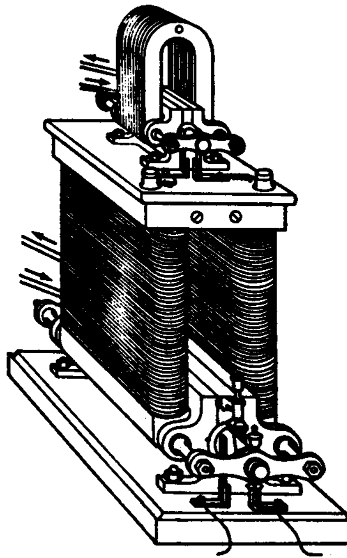
هشت سال بعد، در ۱۸۶۴ آقای هنری وایلد[1] می‌خواست از یک مولد کوچک زیمنس برای تحریک آن عده مغناطیسهای برقی استفاده کند که در مولدهای پرتوان وی به‌جای آهنرباهای دائم، نقش القاگر را داشتند. این مگنت زیمنس در بالای دینام نصب شد و تسمهٔ ویژه‌ای با کمک دستگاهی شبیه همین مولد کشیده می‌شد (شکل ۲۱). فیزیکدانی از دانمارک با نام‌سینستدن[2] در سال ۱۸۵۱ طرح این وسیله را پیشنهاد کرده بود اما گویا آن را نساخت. اختراع این وسیله را در آن زمان می‌توان گواه یک تحول مؤثر، گرچه بسیار آهسته طرحهای مربوط به ساختار و آثار درونی مولدهای دانست. در این دستگاه همچنین می‌توان امتداد این تحول را در ماشینهایی که تقریباً در یک زمان، در ۱۸۶۷ بوسیلهٔ ویتستون، ورنر فون زیمنس و س. ا. وارلی[3] ساخته شدند، دید. بحث مربوط به دینامی است که بوسیلهٔ جریانی که در قرقره‌های القاگر آن می‌گذرد راه اندازی می‌شود. القاگرهای خود راه‌انداز به‌نظر مخترعان آن این برتری را دارند که توان جریانی را که مولد تولید کرده است می‌افزاید.

این سه مخترع در توضیحات نخستین خود، لزوم مغناطیسی کردن قبلی الکترودها بوسیلهٔ یک منبع برق خارجی را تأکید می‌کردند (شکل ۲۲). بخوبی روشن است که زیمنس نخستین کسی بود که ثابت کرد که پس از اینکه این عمل انجام گرفت مغناطیس مانده در هسته‌های الکترودهای القاگر، کار تحریک برای راه‌اندازی را تأمین می‌کند.

چند هفته بعد، فیزیکدان انگلیسی دیگری، به نام ویلیام لَد[4]، در این راه پیشرفت بیشتری را

۱. H. Wilde (۱۸۳۳ ـ ۱۹۱۹): مهندس انگلیسی برق

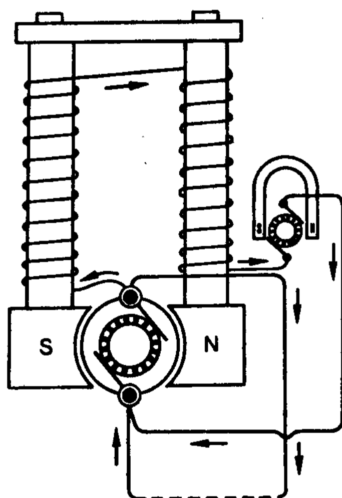
2. Sinsteden 3. S.A.Varley 4. W.Ladd



شکل ۲۱.دینام وایلد (۱۸۶۴).
مگنتی از نوع زیمنس که در بالای القاگرها جاسازی شده است و آنها را راه اندازی می‌کند. تسمه‌های هر دو القاگیر از روی یک محور حرکت‌دهنده می‌گذرند.

نشان داد. آقای لَد در ماه مارس ۱۸۶۷ ماشینی به نمایش گذاشت که در آن زمان به نام وی شهرت یافت. این ماشین دارای دو القاگیر زیمنس بود که بین قطبهای دو آهنربای مغناطیسی صاف می‌گردیدند. القاگیر کوچکتر قرقره‌های القاگر را تغذیه، و القاگیر بزرگتر، جریان مدار را تأمین می‌کرد. آقای لد، دو ماه بعد اظهار داشت که از تحریک نخستین که زیمنس لازم می‌شمرد، می‌توان چشم پوشید و مغناطیس طبیعی آهن نرم، در همان نخستین اثر برای تحریک قرقره‌ها کافی است.

دیده می‌شود که آزمایشهای متعدد و ساختهای گوناگون طی این سالها رفته‌رفته به طرح آقای گرام انجامید که اقدامات مخصوص خود را آغاز کرده و در شرف به‌کار گرفتن آن بود.



شکل ۲۲.نمایش تحریک القاگرها بوسیله مدار منشعب از یک مگنت.

۲

نوآوری برق صنعتی

پیدایش و پیروزیهای دینام

فیزیکدانان، ابزارسازان و مخترعان در دهۀ ۶۰ کوششهای بسیار فشرده‌ای روی مولدها به‌عمل آوردند. مرور راه‌حلهای بسیاری که در این مدت کوتاه پیشنهاد شدند ممکن نیست، اما نتیجۀ همۀ آنها طرح اولیه‌ای بود که با ساخت نخستین دینامهای تسنوبه گرام[1] پیشنهاد شد.

دو دهۀ پس از آن (۱۸۷۰ تا ۱۸۹۰) وقف اختراعی است که بدرستی می‌توان آن را برق صنعتی نام نهاد و دستاوردهای زیر: گذر از مولدهای الکترومغناطیسی به دینامها، کشف برگشت‌پذیری ماشینهای اخیر و به‌کارگرفتن موتورهای برقی، آزمایشهای اولیه دربارۀ انتقال جریان برق و ساخت ترانسفورماتور (مبدل)ها از مشخصات این دو دهه هستند. دیده می‌شود که این اختراع در واقع، آفرینش پیوسته‌ای است که افراد زیادی در آن سهیم بوده‌اند. وانگهی این آفرینش در دوره‌ای از تحول تکنیکها و فعالیت اقتصادی صورت گرفته که همۀ شرایط لازم برای گذار پرشکوه و سریع آن فراهم بوده است.

---

1. Zénobe Gramme

نقش گرام: آغاز قطعی برق صنعتی را بدرستی به گرام نسبت می‌دهند. نوآوریهای وی عبارتند از القاگیر (آرمیچر) حلقوی با سیم‌پیچ پیوسته و «کلکتور»ی که بی‌شبهه طرح شخص وی بوده است. در حقیقت روشن نیست که کارهای او در این زمینه، که پس از ده سال به پیروزی قطعی انجامید، در چه شرایط فکری و مادی انجام گرفته‌اند.

گرام که تبار بلژیکی داشت فاقد استعداد ادامهٔ زیاد تحصیل در مدرسه بود. وی در ۱۸۵۵، زمانی‌که تقریباً سی سال داشت، برای زندگی کردن به پاریس و به‌عنوان سازندهٔ قالب و مبل دست به‌کار شد. او در این شغل برای کارگاه کریستوفل[۱] قالبهایی ساخت که از اختراعات به ثبت رسیدهٔ الکینگتن و روئولس[۲] در ساختن قالبهای قطعات زرگری با روش آبکاری برق شیمیایی استفاده می‌شد. او بناچار برای شرکت آلیانس نیزکار می‌کرد. ماشینهای این شرکت، قطعات اساسی متعددی از چوب داشت که باید بدقت تهیه می‌شدند. آقای گرام با مؤسساتی که از تکنیکهای نوین برقی برای دو رشتهٔ بسیار فعال آن زمان استفاده می‌کردند، نیز مربوط شد: گالوانوپلاستی و روشن‌سازی با برق. بدون شبهه اطرافیان وی از مدلهای گوناگون مولد مغناطیسی برقی، که حرفه‌ای کم‌وبیش کوتاه‌مدت شده بود زیاد صحبت می‌کردند. آقای الکینگتن در انگلستان، لااقل به‌طور جزئی برای تغذیه لگن گالوانوپلاستی خود از مگنت استفاده می‌برد و آقای کریستوفل در پاریس با نواقص پیلهای بزرگ برقی دست‌وپنجه نرم می‌کرد. نواقص ماشینهای وان مالدرن غالباً می‌بایست رفع‌ورجوع می‌شدند و پس از اشتغال گرام، انتظار آن می‌رفت که مغز کنجکاو وی همراه بلندپروازیش، ـ برای اینکه او هم بنوبهٔ خود نوع تازه‌ای مولد عرضه کرده باشد، و بالاخره داشتن دستهای آزموده، قدرت تشخیص و روحیهٔ عملگرای، او را تشویق کنند ـ بدین میدان گام نهد.

گویا او لااقل در آخرین مراحل کارهایش از راهنماییهای چند فیزیکدان بسیار آگاه با گرفتن اطلاعات علمی از برق معاصر از آنها بهره گرفته باشد. گرچه وی این احتمال را رد می‌کند و بدلیل گذشته‌اش شخصیتی ساده‌لوح و خصوصیتی خشن داشته است و بدین جهت افسانه هوشمند نابغه با وی سازگار نیست و تنها می‌توان پذیرفت که با نوشته‌های علمی مربوط به برق آشنا بوده است و می‌توانست نتایج همکاران خود را در اختراعات برقی تحلیل کند. آقای گرام در واقع از یک خانوادهٔ بسیار تنگدست اما با سواد برخاسته بود و در جوانی هم علاقه‌ای به تحصیل نداشت و محققاً بیشتر به‌کار دستی متمایل بود تا مطالعه. سرانجام باید به‌یاد آورد که پیش از سال ۱۸۶۰

۱. Christofle، شارل (۱۸۰۵ـ۱۸۶۳)، صنعتگران فرانسوی، پایه‌گذار زرگری کریستوفل در پاریس.

۲. Ruolz، هانری دو (۱۸۱۱ـ۱۸۸۷)، فرانسوی؛ وی با الکینگتن انگلیسی روش خاصی برای آب نقره دادن ابداع کرد که به نام خود اوست.

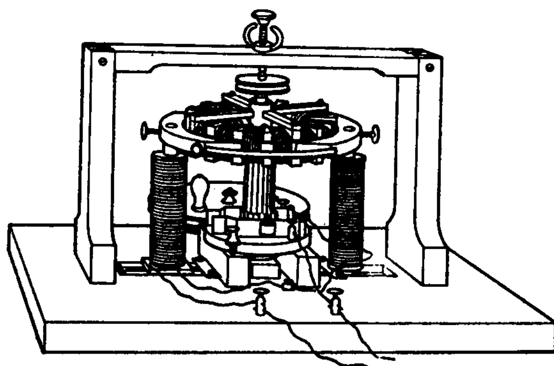
هم، کاربرد مغناطیسهای برقی، برای القا مورد بحث بوده اما در سالهای پس از آن مورد استفاده قرار گرفته است.

پیشگامی پاچینوتی: در پایان باید گفت که دستگاه پاچینوتی؛ گواه روشنی است که این اندیشه را می‌توان شکاری در تیررس دانست. آقای آنتونیو پاچینوتی در پیسا استاد فیزیک بود و زمانی‌که نخستین دینام را ساخت برای کارهای آزمایشی بود. این دانشمند ایتالیایی بر آن بود که موتوری بسیار بهتر از موتورهای آقای فرومان بسازد. اما حتی پیش از آنکه آن را به نمایش گذارد به برگشت‌پذیری آن واقف بود، بدین معنی که این ماشین با تغذیه از جریان یک پیل، همچون موتور کار می‌کرد، اما چنانچه آن را به مدار بسته‌ای اتصال می‌دادند و روتور آن را به‌طور مکانیکی می‌گردانیدند ایجاد برق می‌کرد.

دستگاه پاچینوتی اساساً، در ده سال پیش از دستگاه گرام مشخصات اصلی دینام دستگاه گرام را داشته است (شکل ۲۳). القاگیر آن حلقه‌ای از آهن نرم بود که در فواصل منظمی برجستگیهایی به خارج داشت. این حلقه، سیم‌پیچی متشکل از ۱۶ قرقره را حمل می‌کرد و مارپیچهای آن جملگی در یک جهت بودند. سیم خروجی یکی و سیم ورودی بعدی به یک رسانای کلکتور متصل می‌شدند. بدین‌ترتیب هر قرقره به توسط یک صفحه نازک مسی که روی استوانهٔ چوبی کوچکی کوبیده شده بود به کلکتور مرکزی که پاچینوتی آن را کموتاتور می‌نامید، اتصال داشت. دو کلکتور روی این استوانهٔ چوبی به‌شکل ضربدری گذاشته شده بودند. القاگر از دو مغناطیس برقی تشکیل می‌شد که پاچینوتی به‌کمک یک منبع خارجی آن را تحریک می‌کرد. زمانی‌که این دستگاه قرار شد به‌عنوان مولد کار کند، دو مغناطیس برقی را با دو آهنربای دائم عوض کردند.

دیده می‌شود که پاچینوتی هر دو راه‌حل مهم ساخت دینامهای صنعتی را داده است: حلقهٔ با سیم‌پیچی پیوسته، و کلکتور (که وی آن را کموتاتور می‌نامید). اما وی اصل راه‌اندازی اتوماتیک (یا با لفظ آن زمان surexcitation) را نیندیشیده بود. وانگهی کارهای پاچینوتی بکلی نادیده گرفته شدند. دستگاه وی در سال ۱۸۶۱ ساخته شد و توضیح آن در یک مجله ایتالیایی با تیراژ کم با نام *Il Nuovo Cimento* در ۱۸۶۴ به چاپ رسید. در این زمان گویا تقریباً در هر ماه در مجلات علمی کشورهای گوناگون مقاله‌ای دربارهٔ یک ماشین جدید دینامو الکتریک چاپ می‌شد و تعداد زیادی از ماشینهای جدید نیز موقتاً نادیده گرفته می‌شدند. وانگهی شهر پیسا یک مرکز صنعتی نبود و هیچ‌یک از سرمایه‌داران از محسنات ماشین پاچینوتی اطلاع نیافتند.

با این‌همه، پس از موفقیتهای دینام گرام، انتشارات این دانشمند ایتالیایی بازخوانی و غالباً



شکل ۲۳.دستگاه پاچینوتی.
حلقهٔ القاگیر بین قطبهای باز شدهٔ دو القاگر عمودی، به‌طور افقی کار گذاشته شده است. در پایین، محور القاگیر «کموتاتور» با دو کلکتور آن دیده می‌شود. در پشت، میل‌لنگی است که دستگاه را به مولد تبدیل می‌کند.

تفسیر شد. گرچه اختراعات گرام و پیروان متعدد وی به‌طور گسترده‌ای مورد دستبرد قرار نگرفتند، مکانیسمهای اساسی آنها در مراکز معمولی و بوسیله بعضی صنعتگران، مانند مریتانس به‌کار گرفته شدند.

پیدایش دینام گرام: نخستین آزمایشهای تسنوبه گرام بمنظور اصلاح مدلهای دستگاههای شناخته شدهٔ آن دوران بود. بنابراین در سال ۱۸۶۵ یک کپی از دستگاه پیچ ساخت که القاگر آن یک مغناطیس برقی افقی بود. سپس گویا متوجه شد که یکی از راه‌حلهای مشکلات در طرز ساخت حلقه دارای سیم‌پیچ پیوسته نهفته است. مدتها بود که از یکی از این حلقه‌ها که تاریخ ۱۸۶۸ را بر خود داشت استفاده می‌شد. ورق نازکی از آهن نرم را به‌شکل حلقه جوش داده بودند و تعدادی قرقره تنگ هم چیده شده آن را در میان می‌گرفتند. دو سر سیم را روی آن به یکدیگر جوش داده بودند. این حلقه روی یک چوب گردان حمل می‌شد و جاروبکها، به‌شکل ضربدری مستقیماً با تکه‌ای از سیم لخت مارپیچی اصطکاک می‌یافتند. دو سال بعد، گرام، سیم‌پیچی از قرقره‌های مجزا از هم طرح کرد که سیمهای ورودی و خروجی آنها به سیمهای ورودی و خروجی بوبین مجاور به‌واسطه ورقهٔ نازکی از آلیاژ برنج لحیم شده بود، ـ مکانیسمی که طرح اولیه کلکتور را تشکیل می‌داد. پاچینوتی این طرح را در سال ۱۸۶۱ پیشنهاد کرده بود. نخستین دستگاه گرام با

چهار قطب و القاگری از دو مغناطیس برقی همان بود که آقای ژول ژامن در ماه ژوئیهٔ سال ۱۸۷۱ به آکادمی علوم فرانسه ارائه داشت و مجهز به چنین حلقه و کلکتور بود.

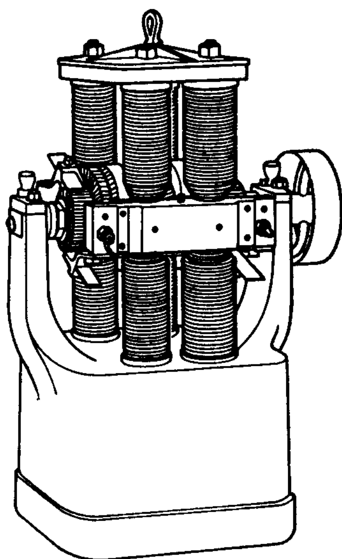
گرام تا این سال، تنها مگنتهای دارای آهنربای دائم برای اجرای آزمایشهای خود ساخته بود. شرکتی صنعتی که سرمایهٔ آن را کنت ایورنوا[1] تأمین کرده و مدیریت آن به‌عهدهٔ ایپولیت فونتن بود برای به‌کارگیری اختراعات ثبت شده گرام در زمستان ۱۸۷۰ ـ ۱۸۷۱ تأسیس شد. اما انواع اولیه بازاری و بویژه مگنتهای مجهز به حلقهٔ نوع تازه را کارگاه لویی برگه می‌ساخت. از سوی دیگر، چنین می‌نماید که شرکت گرام ـ فونتن در سالیان نخستین فعالیت خود، حقوق اختراعات خود یا لااقل بخشی از آن را به عده‌ای از سازندگان غیرحرفه‌ای از قبیل: لویی برگه، سوتر ـ لمونیه[2] یا مینیون و روار در فرانسه و کارگاههای متعدد دیگری درکشورهای دیگر واگذاشت. برروی‌هم آقای گرام هشت اختراع را به ثبت رسانیده بود.

نخستین دستگاه گرام: مدل القاگیر با کلکتور آن که دو جاروبک با آن اصطکاک می‌یافتند، به‌طور قطعی در سال ۱۸۷۲ برای ماشینی با چهار مغناطیس برقی و با چهار قطب به‌کار گرفته شد. قطبها دوبه‌دو بودند و در آن زمان آنها را قطب برآیند می‌نامیدند (شکل ۲۴). برپایهٔ مشخصات مورد نظر مشتری، دینام باید جریانی تأمین می‌کرد که برای رسوب‌دادن ۶۰۰ گرم نقره در یک ساعت روی اشیاء برنجی کافی باشد. گرام بدون استفاده از هیچ فرمولی توانست دستگاه خود را محاسبه کند و با توان ۷۵ کیلوگرم، نتیجهٔ دلخواه را به‌دست آورد (شکل ۲۵).

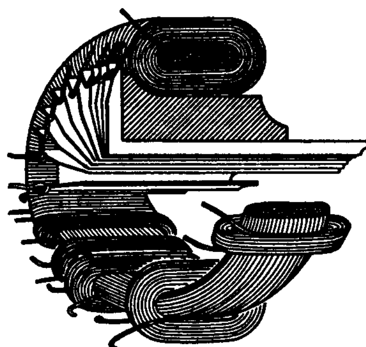
شرکت ماشینهای الکترومغناطیسی گرام بی‌درنگ انواع متعددی دینام عرضه کرد: مدلی با چهار قطب و چهار مغناطیس برقی عمودی، و نیز چندین نوع فرعی از این مدل با دو مغناطیس الکتریکی که به‌طور افقی جاسازی شده بودند با تعدادی کفشک قطب لفافی (شکل ۲۶). هرکدام برای کار خاصی ساخته شده بودند: گالوانوپلاستی، روشن‌سازی با لامپ قوسی و بالاخره ویژهٔ کارگاه. قرقره‌های القاگر روی همهٔ مدلها، یا به‌طور زنجیری (شکل ۲۷) یا به‌شکل موازی با قرقره‌های القاگیر (شکل ۲۸) نصب می‌شدند تا به توسط جریان دینام تحریک شوند. تحریک اتوماتیک برای راه‌اندازی بوسیلهٔ مغناطیس مانده تأمین می‌شد. در این مکانیسم اصول مورد نظر گرام در سال ۱۸۶۸، بروشنی رعایت شده است. القاگیرهای همهٔ این مدلها بر همین پایه ساخته می‌شدند، هستهٔ این حلقه، دسته‌ای میله‌های نازک فولادی بود که در سیستم قرقره‌های ساخته شده از سیمهای مسی گنجانیده شده بودند.

هستهٔ تشکیل شده از میله‌های فولادی، این مزیت را داشت که جریان فوکو (یا گردابی) را

1. Ivernois 2. Sauter-Lemonnier

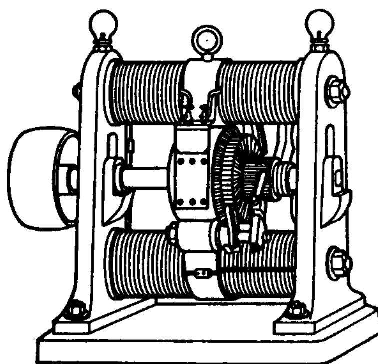


شکل۲۵.دستگاه گرام با چهار قطب، که در سال ۱۸۷۲ برای کارگاه زرگری کریستوفل ساخته شد.

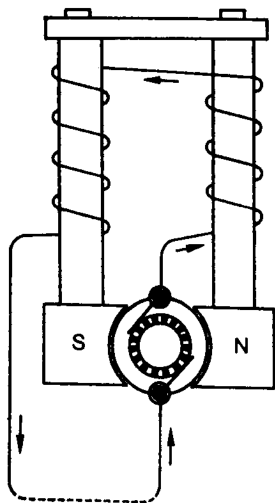


شکل۲۴.مقطع القاگیر (مشهور به حلقهٔ گرام) (۱۸۷۲).

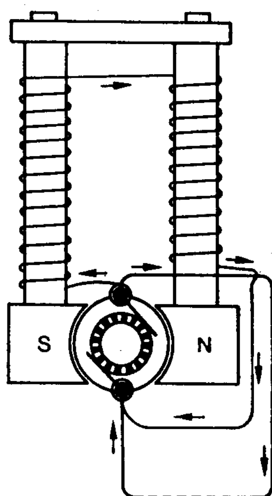
در این مقطع، هسته که از تعدادی میله‌های آهن نرم تشکیل شده است و نیز سیم‌پیچهای متشکل از قرقره‌ها و نیز ورقهای برنجی که کلکتور را تشکیل می‌دهند دیده می‌شوند.



شکل ۲۶.دینام گرام، مشهور بنوع A کارگاه (۱۸۷۴).



شکل۲۷.نمایهٔ اصال زنجیری القاگرها (دینام زنجیری).



شکل۲۸.نمایهٔ اتصال موازی القاگرها (دینام شنتی).

حذف می‌کرد. کلکتور، شکل کلاسیکی داشت که مدتها آن را حفظ کرد. هر دو جاروبک همچون فرچه‌ای از سیمهای برنجی عمل می‌کردند که به‌شکل ضربدری با فرجه‌ای نسبت به خط قطبها گذاشته می‌شدند، زیرا اعوجاج میدان القاگیر گردان در نظر گرفته شده بود. کاربرد جاروبک از سیم برنجی سبب کاهش بسامد (فرکانس) و شدت جرقه‌های برقی می‌شد. با این حال، تولید جرقه‌ها در بستهای کلکتور بازیکی از مشکلات بسیار پیچیده‌ای بود که نخستین تکنسین‌های برق باید بر آن غلبه می‌کردند.

سرانجام ساختار کلی دستگاههای گرام، بویژه بدنهٔ آنها، موتورهای محکمی بودند که معمولاً چندین ده سال بدون هیچ حادثه‌ای کار می‌کردند.

موارد موفقیت برگشت‌پذیری: حوادث متعددی موجبات موفقیت سریع دینامها و به‌طورکلی دستگاههای گردان را فراهم آوردند. نخست، آشکار شدن برگشت‌پذیری این دستگاه بود. این نمایش در دو مرحله انجام گرفت که مرحلهٔ دوم ظاهراً ربطی به مرحلهٔ اول نداشت.

در ۱۹ ماه مه ۱۸۷۳ دو فیزیکدان به نامهای نیوده[1] داماد لویی برگه، و پلانته در برابر اعضای آکادمی علوم فرانسه آزمایشی را اجرا کردند که نشان می‌داد که دینام می‌تواند نقش موتور را هم

1. Niaudet

داشته باشد اما نمی‌تواند بوسیلهٔ دینام دیگری به‌کار افتد. این دستگاه نخست برای شارژ کردن یک آکومولاتور پلانته به‌کار گرفته می‌شد، سپس زمانی‌که همهٔ نیروهای مکانیکی قطع می‌شد، بدون کمترین دستکاری در اتصالات آن، بتنهایی می‌گردید. جهت جریانی که از آکومولاتور گرفته می‌شد معکوس جهت جریانی بود که مولد برای شارژ آن داده بود. موتورهای برقی الکترومغناطیسی چندین بار به توسط منابع شیمیایی برق به‌کار افتادند و به‌نظر می‌رسد که برپاکنندگان این آزمایش استنتاجات خود را تا پایان ادامه داده باشند.

نمایش سرنوشت‌ساز در کمتر از یک ماه بعد، در ۳ ژوئن ۱۸۷۳ توسط آقای ایپولیت فونتن در نمایشگاه برق وین انجام گرفت. آقای لویی فیگیه که رابطهٔ مستقیمی با وی داشت، صحنهٔ نمایش را گزارش کرده است. یکی از بینندگان دو دستگاه گرام عرضه شده را گزارش داده است که یکی را که موتوری گازی می‌گردانید برق می‌داد و دیگری که به توسط یک پیل برقی تغذیه می‌شد به‌عنوان یک موتور کار می‌کرد. وی به آقای فونتن پیشنهاد کرد که دستگاه دوم را به مدار دستگاه نخست، متصل سازد. کار آزمایش، تعیین‌کننده بود و آقای فونتن وسیله‌ای طرح کرد که موتور دینامی می‌توانست یک تلمبهٔ هیدرولیک را به‌کار اندازد و آزمایش خود را با غرور زیاد تکرار کرد.

این داستان احتمالاً درست است و امکان می‌دهد تا بفهمیم که این آزمایشگران تا مدتها با چه مانع فکری کم‌اهمیتی روبه‌رو بودند. مولدهای دارای آهنربای دائم، برق بسیار ضعیف و بی‌ثباتی می‌دادند و در اینکه یک موتور الکترومغناطیسی بتواند با تغذیه از این برق در صنعت به‌کار گرفته شود تردید بسیار وجود داشت و علت اینکه آزمایشهای مربوط به‌کار موتورها، جملگی با یک منبع شیمیایی برق انجام می‌گرفت همین بود. اما از لحاظ تئوری هیچ چیز مانع این نشد که ۳۵ یا ۴۰ سال بعد پدیدهٔ برگشت‌پذیری کشف شود. دیده شد که پاچینوتی در همان سال ۱۸۶۱ بدان برخورد کرده اما اهمیتی بدان نداده بود.

شمع یابلوچکوف: دینام گرام پس از اینکه بی‌درنگ در الکترولیز (برقکافت) به‌کار گرفته شد پس از مدت کمی کاربرد دیگری یافت: تغذیهٔ لامپهای قوسی. از آن در رگولاتور سرن و نیز تولید جریان مستقیم استفاده می‌شد، وسایلی که به‌علت بهای تولیدی بالا و لزوم دستکاری مکرر برای تعویض زغالهای فرسودهٔ رگولاتور، استفاده از تأسیسات دائمی روشنایی برقی برای آنها مطرح نبود. در سال ۱۸۷۶ اختراع بسیار هوشمندانه‌ای این مشکل را آسان ساخت. این اختراع از آن یک مهندس روسی تلگراف با نام پاول نیکلایویچ یابلوچکوف بود که در تاریخ گفته شده در پاریس یک «شمع برقی» ساخت که به نام وی به ثبت رسید. او دو میلهٔ زغال را به‌جای اینکه در خط مستقیم و



شکل ۲۹.نمایهٔ شمع یابلوچکوف. در بالا، زغالهای اشتعال. نما از بالا.

روبه‌روی یکدیگر قرار دهد، عمودی و چسبیده به‌هم گذاشت. پوششی از گل رس دو میله زغال را به‌طوری از یکدیگر جدا می‌ساخت که بین دو سر بالایی آنها که در یک سطح قرار داشتند، قوسی برقی پدید می‌آمد. نوار کوچکی از زغال آنها را به یکدیگر اتصال می‌داد و درگیری قوس را تأمین می‌کرد. این نوار، زود می‌سوخت و قوس به‌طور پیوسته‌ای برقرار می‌شد (شکل ۲۹). برای اینکه هر دو میلهٔ زغال همزمان بسوزند، یابلوچکوف شمعهای خود را با جریان متناوب تغذیه کرد. چون سیستم وی با موفقیت روبه‌رو شد می‌توان پذیرفت که وی نخستین کسی بود که استفاده از جریان متناوب را پایه گذارد.

شمعهای یابلوچکوف در ۱۸۷۶ جهت روشنایی دائم فروشگاهها، باراندازها و خیابانهای پاریس و لندن به‌کار گرفته شدند. این شمعها بوسیلهٔ دستگاههای گرام که اتصال آنها برای تولید جریان متناوب ترتیب یافته بود تغذیه می‌شدند. آقای یابلوچکوف دستگاههای خود را تکمیل کرد و توانست تغییر خودکار شمعهای فرسوده را، که عمر کاری آنها حدود دو ساعت بود، تأمین کند. این شرکت که پشتیبان مالی در پاریس داشت نخستین شرکت ساخت وسایل برقی است که بعدها مقام بسیار مهمی در این صنعت به‌دست آورد ـ مقامی که اهمیت آن هنوز پابرجاست.

شمع یابلوچکوف که بسیار زودتر از لامپهای معمولی برق اختراع شده بود نخستین وسیله‌ای بود که روشنایی مداومی داشت. این شمع توجه را به کاربرد برق صنعتی، که هنوزگامهای اولیهٔ واقعی را برنداشته بود برگرداند. ماشینهای گرام نخستین کاربرد صنعتی را داشتند اما همهٔ ژنراتورهای دیگر هم که بسرعت طی چند سال ساخته شدند در این راه به‌کار گرفته شدند.

نخستین تحول در مولدها: حوادثی که گرام و دینام وی در مرکز آن قرار داشت تبلور و توجیه نهضتی از تحقیقات را سبب شد که تا آن زمان بسیار نابسامان بود. گرایش نیرومندی برای بهره‌گیری هرچه بیشتر از دینام یا به‌عبارت دقیقتر دستگاههای دورانی الکترومغناطیسی به‌جای کارهای تصادفی و جسته‌گریخته پدید آمد. اصطلاح دینام، پیش از گرام وجود داشت، و گویا در اواخر سال ۱۸۶۶ یا آغاز ۱۸۶۷ همزمان بوسیلهٔ وایلد و زیمنس به‌کار رفته است.

کسانی که پس از گرام در این کار موفق بودند عبارتند از ماشین‌سازانی که در آن زمان با ساختهای قبلی آشنا بودند، یعنی آقایان مریتانس و زیمنس. درگذشته دیده شد که آقای مریتانس چه تغییرات جالبی در ماشینهای آلیانس وارد کرد؛ اگرچه پیشرفت وی زیاد نبود.

دستاورد بنیاد زیمنس و هالسکه[1] بسیار مهمتر بود. در سال ۱۸۷۳ آقای فریدریک فون هفنر آلتنک[2] سرمهندس این بنیاد القاگیر تازه‌ای طرح کرد که اقتباسی از القاگیر ماکویی یا القاگیر «T» شکل مگنتهای وی بود. او با استفاده از شکل طویل این هسته و بزرگتر کردن آن، به‌کمک پره‌های طولی که حول طبلک مرکزی قرار داده بود سیم‌پیچ دستگاه را موازی با محور گذاشت. شش پره با فرجهٔ ۶۰ درجه از یکدیگر، متناظر با دوازده بخش حلقه گرام بودند. مزیت این مکانیسم این بود که میدان مغناطیسی القاگر را در بخش بسیار بزرگتری از سیم‌پیچی القاگیر، جارو می‌کرد؛ درحالی‌که در سیم‌پیچ گرام تنها بخشهای خارجی حلقه فعال بودند (شکل ۳۰).

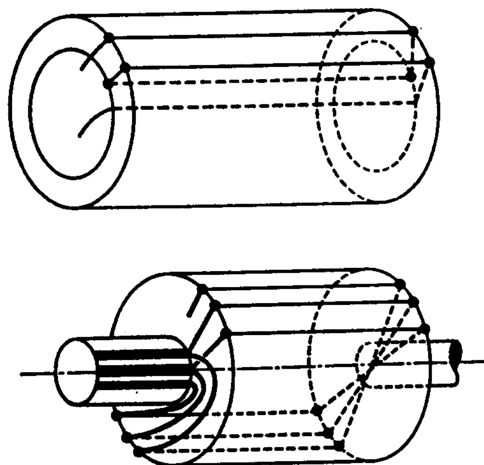
این راه‌حلی تجربی اما منطقی بود، القاگیر طبلکی (استوانه‌ای)، ساخته شدن مولد قویتر، اما کوچکترین را ممکن ساخت. وانگهی چنین می‌نماید که همهٔ این مزایا با تردید زیاد پذیرفته شدند؛ زیرا در سال ۱۸۷۳ درکارخانهٔ زیمنس القاگیرهای حلقه‌ای مشابه القاگیرهای طبلکی و نیز القاگیرهای صفحه‌ای بدون هستهٔ مغناطیسی ساخته می‌شدند.

کمی بعد آقای چ. ف. براش[3] از فیلادلفیا که بتازگی بروشنایی برق علاقه‌مند شده بود ـ گویا حدود سال ۱۸۷۸ نوعی لامپ قوسی ساخته بود که رواج فراوان یافت؛ همچنین وی شکل دیگری

---

1. Halske 2. F. von Hefner Alteneck

۳. Brush، چارلز فرانسیس (۱۸۴۹ـ۱۹۲۹): دانشمند امریکایی.



شکل ۳۰.در بالا، اصول سیم‌پیچی القاگیر گرام به‌شکل حلقه؛ در پایین سیم‌پیچی هفنر به شکل بوبین.

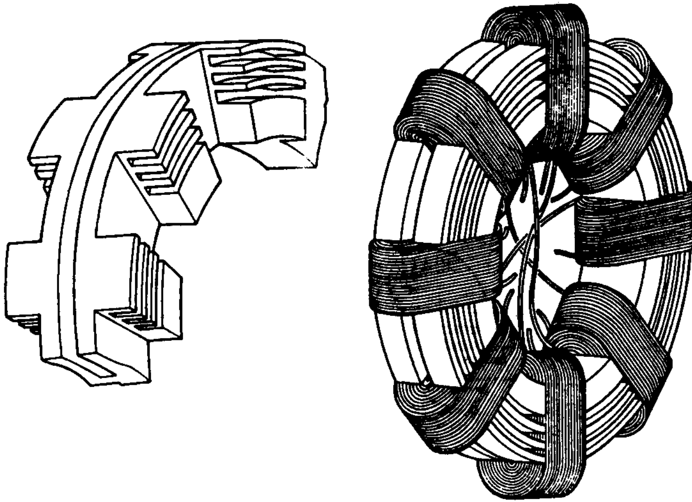
القاگیر برای دستگاهی طرح کرد که آقای دومونسل[1] آن را «تنها یک نوع دستگاه پاچینوتی می‌داند که القاگیر آن به ترتیبی است که القاگرها از پهلو بر حلقه اثر می‌گذارند. بدین‌ترتیب در تولید جریان القایی هر دو طرف آن به‌کار گرفته می‌شوند» (شکل ۳۱).

قرقره‌ها روی حلقهٔ چدنی در تورفتگیهای آن پیچیده شده بودند. هشت قرقره دوبه‌دو، هر یک با قرقرهٔ مقابل خود اتصال زنجیری داشت. سرهای هر جفت به دو تیغهٔ جدا از هم یک کموتاتور متصل می‌شدند. ولتاژی که مولد تولید می‌کرد مربوط به دو بخش بود. القاگیری که بدین‌ترتیب تشکیل می‌شد عمودی بود و بین دو مغناطیس برقی القاگر می‌گردید. الکترودها طوری قرار گرفته بودند که قطبهای همنام آنها روبه‌روی یکدیگر باشند. تحریک اصلی را جریان خروجی تأمین می‌کرد اما بخشی از القاگر به‌طور موازی با کوموتاتور متصل بود تا از گسستن کامل آهنربایی جلوگیری شده باشد.

دستگاه براش را کمی پس از پیدایش، یک هیأت داوری امریکا تأیید کرد و هم در امریکا و هم در اروپا از آن استقبال فراوان به‌عمل آمد.

در دهه‌های ۱۸۷۰ و ۱۸۸۰ یافتن وسایل مستعد تولید بهترین نتایج از راه آزمایش، پیش افتادن از رقبا با ارائه چند ویژگی‌ای تازه جهت جلب مشتری و فرار از حقوق امتیازات پیشین انگیزهٔ

1. Du Moncel



شکل ۳۱.نمایهٔ سیم‌پیچی القاگیر براش و جزئیات تورفتگیهای حلقهٔ چدنی حامل آن.

سیلی از نظرات و ساختهای تازه شدند. تکنسین‌ها هنوز دارای یک ابزار علمی که بتواند کمک آنها در کارهایشان باشد نبودند.

تحول ترکیبات و ساختمان مولدها اساساً بر دو بخش: القاگیر با هسته مغناطیسی آن، قرقره‌ها، کلکتور و اصطکاکهای آن و از سوی دیگر القاگر (اشکال بسیار گوناگون مدارهای مغناطیسی و دستگاه قرقره‌ها) توجه داشت.

القاگیرها: در بخش القاگیرها احتمال می‌رود که آقای گرام از سیم‌پیچی آهنی روی یک میلهٔ محور به‌عنوان هستهٔ مغناطیسی استفاده کرده باشد. زیرا راه‌حل بسیار ساده‌ای است. تعویض این میله محور با دسته‌ای از سیمهای آهنی، همان‌طورکه دیده شد، امتیاز کاهش جریانهای مزاحم فوکو را داشت. اما بخش مستقیم هسته، بد کار گذاشته شده بود و فضای وسیعی خالی مانده بود.

آقای زیمنس با انتخاب استوانه‌ای توپر از آهن نرم برای القاگیر ماکویی خود، راه‌حل بدتری برگزید. آقای هفنر آلتنک برای القاگیرهای طبلکی اولیهٔ خود، تکنیک نخستین گرام را تکرار کرد. چندین لایه از سیم آهنی تابدیده روی استوانه‌ای چوبی سیم‌پیچی شده بودند.

کمی بعد، حدود ۱۸۸۰ آقای وستون[1] با روی‌هم چیدن ورقهای یک میلیمتری آهن که با رنگ یا زرورق عایق شده بودند هسته‌های متورقی را به‌کار گرفت. در همان ایام آقای ادیسن ورقهای

1. Weston

آهن را با پیچ و مهره‌های عمودی روی‌هم چید. این ورقها را بعداً با مجموعه‌ای از خارهای محکم شده روی محور حامل، عوض کرد.

با ایجاد سوراخهایی در ورقهای آهن، عبور هوا امکانپذیر شد و چاکهایی پیرامون ورقها داده شد تا قرقره‌ها در آنها جای گیرند؛ بدین‌ترتیب، القاگیرهای با هستهٔ صاف، که تا آن زمان رواج داشت، تغییر کرد.

بعداً، در پرتو پیشرفتهای تکنیکهای متالورژی توانستند از ضخامت ورقها بکاهند و آن را به ۰/۴ یا ۰/۵ میلیمتر برسانند ـ کاری که در اتلاف و گرم شدن تأثیر مطلوبی داشت. همچنین بعدها بررسی نفوذپذیری مغناطیسی به‌کاربرد فولادهای دارای اتلاف کم انجامید.

سیم‌پیچها را با سیمهای مسی استوانه‌ای، که نخست با پنبه دارای اندود لاک عایق می‌شدند می‌ساختند. بعداً کاغذ را به پنبه افزودند و در مواردی که دما زیاد بالا می‌رفت از نوارهای ساخته شده از پنبهٔ نسوز استفاده کردند. مجموعهٔ قرقره‌ها را حلقه می‌انداختند و لاک می‌زدند تا از شکل نیفتد.

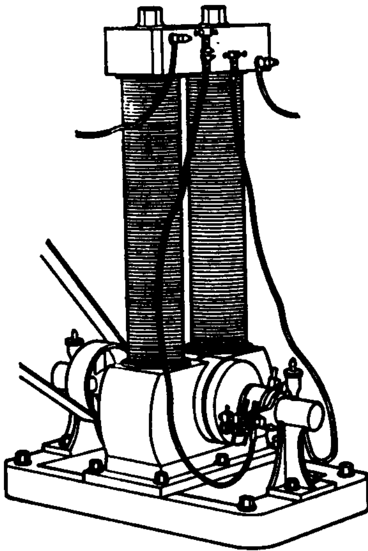
در مورد دینامهای آبکاری یا الکترومتالورژی که در طی پانزده سال نخستین کاربرد برق صنعتی بسرعت گسترش یافته بودند از رساناهای ضخیم استفاده می‌شد. این رساناها از همان ابتدا، از کابلهای با رشته‌های نازک، که به‌شکل مربع یا چهارگوش جمع شده بودند تشکیل می‌شد.

حدود سال ۱۸۸۵ تهیه بخشهایی را از القاگیر به‌طور پیش‌ساخته بوسیلهٔ آقایان آیکمایر[1] و رنه توری[2] آغاز شد تا اینکه آنها را در چاکهای مربوطه جای دهند ـ چاکهایی که بعداً توسط کلافهای نخ بسته می‌شدند.

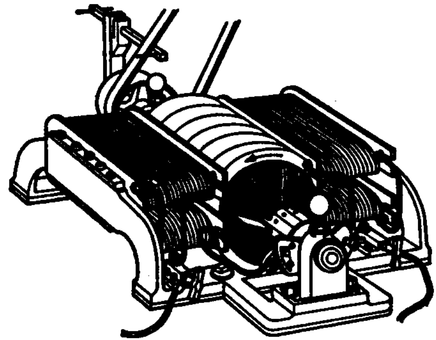
انواع کلکتور: آقای گرام کلکتورهای خود را از مس سخت می‌ساخت، اما برنج و حتی آهن هم برای این کار آزمایش شده‌اند. برای اینکه ورقهای فلزی را از یکدیگر، یا این ورقها را از بوش عایق سازند به‌جای مخلوطی از کاغذ و نخ میکا را به‌کار گرفتند. سطح بیرونی کلکتور می‌بایست کاملاً استوانه‌ای باشد. ورقها را پیش از تراشکاری، با دو حلقهٔ دارای بدنهٔ مخروطی و آستری از میکا، پرس می‌کردند.

اتصالات قرقره‌های القاگیر در کلکتور در آغاز پیچی بودند اما بعدها لحیمکاری شدند. کموتاتورهای گرام، جاروبکهایی واقعی از سیمهای برنجی قلع‌اندود بودند. بعدها ورقهای مسین که پیرامون آنها چاکهای طولی زده شده بود به‌کار گرفته می‌شد، سپس بافه‌هایی از مس فشرده و سرانجام، حدود ۱۸۸۵، بوسیلهٔ فوربز، میله‌های زغالی به‌کار رفت.

1. Eickemeyer 2. Thury



شکل۳۳.دینام ادیسن، نوع Z



شکل۳۲.دینام زیمنس، نوع DO

القاگرها: القاگرها بسیار گوناگون بودند تا اینکه حدود ۱۸۸۶ بررسی مدارهای مغناطیسی، شکل منطقی آنها را به‌دست داد. در مولدهای اولیهٔ گرام، هسته‌های توپر از آهن نرم، استوانه بودند و در وسط آنها آهنربایی کارگذاشته شده بود تا قطبهای مورد نظر در هسته‌ها پدید آیند. در مولدهای زیمنس این آهنرباها در دو قطب ممتد بودند اما مولدهای ادیسن حالت لفافی داشتند (شکلهای ۳۲ و ۳۳).

زمانی‌که سازندگان مولدها و استفاده‌کنندگان از آنها فراوان شدند، در سی سال ۱۸۸۰ ـ ۱۹۱۰ شاهد شکوفایی انواع مولدها هستیم که در فصل بعدی به‌اختصار از آنها یاد می‌کنیم.

مبانی بررسیهای نظری: تنها چند سال پس از طرح دینام گرام و ساخت صنعتی انواع اولیهٔ آن توسط کارخانه‌های مختلف کشورهای گوناگون، نظریه‌پردازان که در پیدایش این وسیله هیچ‌گونه سهمی نداشتند بررسی قضایای مربوط به آن را شروع کردند. این دخالت نظریه نیز یکی از مراحل تاریخی بسیار پراهمیت آغاز برق صنعتی است. گسترش بسیار سریع الکتروتکنیک پس از پشت‌سر گذاردن یک دههٔ کوتاه تجربه‌های کورکورانه، به‌طور اساسی با دو نیروی حدت ذهن نظریه‌پردازان و استادکاری سازندگان انجام گرفت.

در دورانی که ترمودینامیک هنوز نمی‌توانست برای تکنیک یار درخوری باشد و دستاوردهای

نخستین شیمی سنتز برپایه‌های استحکام یافتهٔ دانش قرار گرفته بودند، دینام نقطهٔ آغازی شد که رشته تازه‌ای از دانش، تنها بقصد بیشترین استفاده از یک وسیلهٔ فنی موجود، از آن مایه گیرد. این حرکت در آن زمان تازه بود و چنانچه بخواهند تاریخ تکنیک را با توالی انقلابات کم‌وبیش بخوبی مشخص توضیح دهند برای شناسایی آغاز یک انقلاب دوم یا سوم صنعتی، این حرکت باید در نظر گرفته شود. جالب است بدانیم که هواداران این روش تفسیر تاریخی، از کنار آن گذشته‌اند.

در جریان همهٔ این مراحل اولیه، ابعاد دینامها به تجربه تعیین شدند. یا می‌توان گفت که شم صنعتی، با در نظر گرفتن وسایل تولید موجود در آن روزگار، سازندگان را بدان ابعاد رهبری کرده است. در سال ۱۸۷۹ آقای لویی برگه تصمیم گرفت که ساخته‌های خود را برپایه‌های محکمتری قرار دهد.

در این زمان انتخاب‌کنندگان شکل القاگیر، بیشتر به عامل اقتصادی می‌اندیشیدند: حلقهٔ گرام یا طبلک آلتنک کدام‌یک بصرفه نزدیکتر بودند. آقای برگه نشان می‌داد که این انتخاب بستگی بنوع و چگونگی استفاده از ماشینی دارد که قرار است ساخته شود و در این انتخاب باید مصرف هرچه کمتر مس را در نظر گرفت.

پس از آن آقای برگه که در مقام یک فیزیکدان، هم با تجربه و هم با کار صنعتی رابطهٔ خود را گسسته بود درپی یافتن علت ایجاد فرجه بین کموتاتورها و خط خنثی نظری برای خفه کردن جرقه‌ها در کلکتور گرام برآمد. از دیرباز و در آن زمان نیز این اصلاح در کموتاتور کلارک انجام گرفته بود، بدون اینکه غم تفسیر آن را داشته باشند. آن را منسوب به اینرسی مغناطیسی ناشی از این واقعیت می‌دانستند که القا لحظه‌ای نیست.

آقای برگه به بررسی رفتار مغناطیسی دستگاهی که دو قطب مغناطیسی و یک حلقهٔ واسطه داشت همت گماشت و بعد همان دستگاه را که با دو رسانای برق تکمیل شده بود اما ضمناً بخشهای فعال مارپیچهایی آقایان گرام و آلتنک را نیز واجد بود مورد مطالعه قرار داد. او درون حلقه و در طیف با خط نیرویی مواجه نشد. میدان مغناطیسی تنها روی بخشی بیرونی رساناها اثر می‌گذاشت. حداکثر تراکم خطهای نیرو در جهت عمود بر بخش مرکزی جرمهای قطبی دیده شد.

آقای برگه جریانی را در رساناها که در زمان کار ماشین مانند یک موتور عمل می‌کردند، گذرانید و اعوجاج میدان برخاسته از ترکیب میدان القاگرها و میدانی که بوسیله به‌اصطلاح حلزون گالوانی ایجاد شده بود را رسم کرد. خط بی‌اثر به عقب میدان دوران جابه‌جا شده بود.

چنانچه ماشین به‌عنوان ژانراتور کار می‌کرد خط بی‌اثر به جلو میدان انتقال می‌یافت. باز برگه

آنچه را «واکنش القاگیر» می‌نامیدند معرفی کرد و معلوم ساخت که نتیجهٔ فرجهٔ حلقه‌های لغزان است.

اظهار نظرهای برگه ادامه دارد: میدانی که برخاسته از رساناهاست در حقیقت، نه زاییده قطعات ثابت، بلکه معلول قطعات متحرک است. این رساناها بدین‌ترتیب محل نوعی نیروی برق‌وارانی مقابل نیروی برقرانی آن منبع بیرونی است که القاگیر را تغذیه می‌کند. این میدان به‌هنگام کار ضعیفتر می‌شود. بنابراین هرقدر سرعت گردش موتور بیشتر شود فرجه خط بی‌اثر بزرگتر خواهد شد. چنانچه القاگرها را به‌طور زنجیری تحریک کنند، جابه‌جایی خط بی‌اثر، تنها در زمان اشباع القاگیر، محسوس می‌شود. کاستن از واکنش القاگیر کار مفیدی است و یکی از روشهای مورد نظر برای این کار افزایش مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) عرضی، مثلاً با ایجاد چاکهایی در جرمهای قطبدار است.

دانشمندان دیگر کارهای برگه را پی گرفتند. در سال ۱۸۷۹ آقای الوتر ماسکار[1] فرانسوی نشان داد که نیروی برقرانی القاگیر در یک حلزون، تناسب مستقیم با سرعت تغییر شاره‌ای دارد که از آن می‌گذرد. آقای جان هاپکینسون[2] انگلیسی نمودارهایی را پیشنهاد کرد که نسبتهای موجود بین مقدارهای اساسی مؤثر در یک دینام و مدار بیرونی مورد تغذیه از آن نیروی برقرانی، ولتاژ در بستها، سرعت گردش، شدت جریان خروجی و بازده، روی آن نمودارها مستقیماً خوانده می‌شد.

آقای‌مارسل دپره[3] کاربرد نمودارهای هاپکینسون را گسترش داد و آنها را نمودارهای مشخصه (کاراکتریستیک) نامید. وی در جریان کارهای خود روی تئوری دینام، که در سال ۱۸۸۴ آغاز کرده بود ـ و پیش‌درآمدی برای کارهای وی دربارهٔ انتقال برق است ـ آن را عرضه داشت.

در این زمان نظریه‌پردازان دینام و مدارهای مغناطیسی فراوان شدند. در جنب آقای هنری ا.رولند[4] که از سال ۱۸۷۳ به این قضیه دل بسته بود، بویژه باید از آقایان جان و ادوارد هاپکینسون نام برد که در جریان کارهایشان در سال ۱۸۷۹ که در ۱۸۸۴ و ۱۸۸۶ نیز بدان ادامه دادند به نتایج بسیار پراهمیت و کلی دست یافتند. برادران هاپکینسون فرمولهایی تنظیم کردند که به‌کمک آنها، مدار مغناطیسی محاسبه می‌شد. در شباهت با قانون اهم، شاره مغناطیسی، خارج قسمت نیروی مغناطیسرانی بر مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) تعریف می‌شد. مقاومت مغناطیسی با تشابه با رساناهای برقی نوعی مقاومت مغناطیسی است که درون هسته‌ای از آهن نرم که تحت تأثیر یک میدان برقی قرار دارد پدید می‌آید. این شاره تابعی از حاصلضرب تعداد پیچهای القاکننده بر شدت

1. E.Mascart 2. J.Hopkinson

۳. M.Deprez (۱۸۴۳ ـ ۱۹۱۸): فیزیکدان و الکتریسین فرانسوی.

۴. Henry A. Rowland (۱۸۴۸ ـ ۱۹۰۱): فیزیکدان امریکایی.

جریانی است که از آن پیچها می‌گذرد، به‌عبارت دیگر همان آمپر ـ دور است و نسبت معکوس با ضریبی دارد که تابع طول هر بخش از مدار مغناطیسی، مقطع و نفوذپذیری آن است.

این نوآوری مهم فرمولهای هاپکینسون محاسبهٔ «مقدار نشت مغناطیس»، یعنی انشعابات زیان‌آور در یک مدار القاگر و یک مدار القاگیر را ممکن ساخت. با این فرمولها که تکمیل شده بودند می‌توانستند مقادیری را که تکنسین‌ها از راه تجربه برای بدنهٔ دینام و موتور در نظر می‌گرفتند بادقت زیادی به‌دست آورند و منطقیترین شکلها را، که به استوانه نزدیک می‌شد، با کفشکهای قطبی متناسب ارائه دهند.

نمونه‌ای از روابط دانش و فن

بدین‌ترتیب، در کمتر از پانزده سال، تئوری پایه‌های استوار نخستین خود را گذاشت، اما نتوانست آن را در عمل پیاده کند زیرا تکنیک، در پرتو شم درست مردان کار و طبعاً با استفاده از سطح بالای وسایل مادی در دسترس، قبلاً توانسته بود مدلهای گوناگونی از این ماشین بسازد. می‌توان پرسید چرا پیش از کار آقای‌گرام فیزیکدانان و ریاضیدانان به بررسی این ماشین علاقه‌مند نشده بودند. دانشمندان در واقع در ۶۰ سال پیش همهٔ مطالب علمی مربوط به آن را در سطح بالایی «در اختیار» داشتند؛ این مطالب به‌کمک فرمولبندیهای ریاضی توضیح داده شده بود. اما این توضیحات همواره خصلت پژوهشهای نظری داشت؛ گرچه در «کاربردهایی» که احیاناً متضمن سود عملی هم بودند می‌شد نظرات بسیار درستی از آنها استخراج کرد. چنین موردی تا آن زمان پیش نیامده بود و کاربردها از حد توان این ماشینهای الکترومغناطیسی، که حیطهٔ عمل نسبتاً محدودی داشتند، فراتر نرفته بود.

می‌توان دقیقاً اندیشید که ماشینهای بزرگ الکترومغناطیس می‌توانستند موضوع یک چنین تحلیل عملی قرار گرفته باشند. حتمی است که پدیده‌های درونی این ماشینها به‌اندازهٔ پدیده‌های درونی دینام پیچیده نبود؛ اما بی‌شبهه چند مفهوم بنیادی بیان شدند و این مفاهیم گویا زمانی‌که در دینام به محک تجربه درآمدند به‌طور اساسی مورد تجدید نظر قرار گرفتند. اما، مسأله این نیست که بدین پرسش پاسخ دهیم که آیا تئوری می‌توانست اختراع دینام را جلو بیندازد؟

تنها می‌توان به این واقعیت اشاره کرد که نظریه‌پردازان در عصری که ویژگی آن گسترش زیاد نظریه‌های الکترومغناطیسی فیزیک بود؛ به ماشینها توجهی نداشتند.

در واقع، در برابر ما نوعی فرآیند روابط دانش ـ فن قرار دارد که تا مدتها پایدار خواهد بود و

از مشخصات کلی سدهٔ نوزدهم است. در مورد ماشین بخار هم با این وضع برخورد داشتیم و نیز در رشتهٔ ساختمانهای فلزی و بویژه پلهای بزرگ ساخته شده در این سده، و حتی در دورهٔ پیدایش برق صنعتی و بالاخره در بخش موتورهای درونسوز همین نوع فرآیند در پیش روی ما است. در همهٔ این موارد تکنسین‌ها راهی برای تکمیل کار خود در پیش گرفتند و دستگاههای روزبه‌روز مهمتری را بتدریج ساختند. نظریه‌پردازان در دنبال کردن تکنسین‌ها و ارائه تحلیلی علمی برای آفریدهٔ آنها به نفس نفس افتادند. آنها غالباً با مقداری تأخیر، خود را به تکنسین‌ها رسانیده‌اند، اما نتایج خاصی که به‌دست آورده‌اند از مرز دستاوردهای زمان چندان جلوتر نبوده است که بتواند برای پیشرفت کار تکنسین، ابزاری در اختیار وی بگذارد. این پیشروی همواره وجود داشته است اما تنها در سایه عمل و تجربه مثلاً بد نیست بدانیم که نظریهٔ مقاومت مصالح، تا میانهٔ سدهٔ نوزدهم، به‌کارگیری فراورده‌های آهنی بوسیله سازندگان را گام‌به‌گام دنبال کرده است. در مورد ترمودینامیک هم باید گفت که پیشرفت موتورهای حرارتی (با هوای گرم) با تأخیر زیاد از آن بهره‌مند شده است.

برق صنعتی نیز مراحل اولیهٔ خود را با همین روال پشت‌سر گذارده است. اما این فرآیند، تنها مدت کمی حاکم بود، حداکثر یک یا دو دهه. در پایان سالهای ۸۰ نظریهٔ مربوط به دینام آن اندازه دقیق شد که احاطه تکنیک بوسیلهٔ نظریه به‌حد چشمگیری رسید یا اگر دقیقتر بگوییم، بدان اندازه، که نوعی تکنولوژی برق، گرچه در سطح مبانی آن، شروع به شکل گرفتن کرد. خود نظریهٔ دینام منطقاً از مدتها پیش توجه کارشناسان را به خود جلب کرده بود. مثلاً آقای‌پل ژانه[1] توانست در سال ۱۹۳۰ بنویسد که مسألهٔ جرقه‌های جاروبکها یکی از دشوارترین مسائل تکنولوژی برق است.

تناوبگر (آلترناتور)ها که بعداً از آنها سخن خواهیم گفت، بستر پدیده‌های آن چنان دشواری بودند که بدون دستاوردهای مهندسان روبه افزایش، با فکر قویاً ریاضی، دستگاههای ابتدایی آقایان گرام و لونتن[2]، از مرحلهٔ تغذیه شمع یابلوچکوف، هرگز فراتر نمی‌رفتند. باز می‌توان از قول آقای ژانه گفت: «یکی از مهمترین (یا دشوارترین) و رایجترین مسألهٔ روز (۱۹۳۰) همانا تحلیل حتی‌المقدور کامل تلفات انرژی در آن دستگاهها بود که عبارت بودند از: تلفاتی که می‌توان آنها را عادی خواند، مالش، تهویه، ماند مغناطیسی (هیسترزیس)، اثرژول در رساناها و... یک بررسی عمیق، شمار بیشتری را آشکار خواهد کرد ـ تا بیست نوع از این تلفات شمارش شده است.»

انتقال برق و رفتار خطوط جریان در همان زمان توجه تکنسین‌های برق را از نو بدین حقیقت جلب کرد که بدون یاری نظریه نمی‌توان این دشواریها را پشت‌سر گذاشت.

1. P.Janet 2. Lontin

نتایج برگشت‌پذیری

اظهارات آقای ایپولیت فونتن در سال ۱۸۷۳ دربارهٔ برگشت‌پذیری دینام گرام موجب شد که الکتروموتور به‌کار گرفته شود. در واقع موتور دینامی با دستکاری جزئی مدل مولد ساخته می‌شد؛ اما برای اینکه الکتروموتور مورد استفاده قرار گیرد مدت ده سال انتظار لازم بود.

تردیدهایی دربارهٔ الکتروموتور: بی‌شبهه از سال ۱۸۷۳ می‌دانستند که شکل قرقره گذاری در حلقه و نیز تکنیک کلکتور، زمینهٔ تازه‌ای از کاربرد خواهد یافت، اما در سالهای نخستین، این امر، نه یک کار جدی بلکه نوعی سرگرمی تلقی می‌شد.

دینام که بوسیله یک ماشین بخار یا موتورگازی کار می‌کرد پس از گذشت مدت کمی خود را با صرفه‌تر و مناسبتر از پیلهای باتری برای صنعت نشان داد. دینام، کار سیاه دستکاری اسیدها و مصرف پرهزینهٔ روی را از میان برد. دینام بر اثر کار بسیار مطمئن، خود را همچون واسطهٔ بسیار انعطافپذیری میان انرژی مکانیکی و انرژی شیمیایی نشان داد که در آکومولاتورهای پلانته ذخیره می‌شد.

برتریهای الکتروموتور بی‌درنگ آشکار شد. این دستگاه می‌توانست با وصل دو سیم بدان تغذیه شود و در همان‌جا مقداری نیروی مکانیکی تولید کند. اما دو عیب بزرگ در آن وجود داشت: هزینهٔ کار آن بسیار بیشتر از ماشین بخار یا موتورگازی بود درحالی‌که بازده انرژی آن ظاهراً از ۵۰٪ بالاتر نمی‌رفت.

در سال ۱۸۵۵، حدود ۲۰ سال پیش از آنکه مسألهٔ موتور صنعتی واقعی مطرح شود، بهای تمام شده یک ساعت کار یک الکتروموتور کوچک، از نوعی که در این زمان ساخته می‌شدند ۸٫۵ فرانک برآورد شده است. منبع انرژی آن یک باتری از پیل به‌اصطلاح «سوزان» با دو کیلوگرم روی، با بهای هر کیلوگرم سه‌ونیم فرانک بود. درحالی‌که در بهای تمام شدهٔ این پیل، استهلاک آن محاسبه نشده بود.

در سال ۱۸۸۱ در موتورهای جدید، قیمت تمام شدهٔ هر موتور به ۲٫۳ کاهش یافت. در این محاسبه استهلاک به‌حساب آمده بود و برای ۳۰۰۰ ساعت کار در سال، بهای هر ساعت کار بیش از ۳٫۵ فرانک نبود. در مقابل، بهای هر ساعت کار سایر انواع موتورها از قرار زیر بود:

ماشین بخار	برای توان بالاتر از ۲۰ اسب	۰٫۱۳ فرانک
ماشین بخار	برای توان بالاتر از ۴ اسب	۰٫۳۲ فرانک
موتورگازی	برای توان بالاتر از ۸ اسب	۰٫۴۴ فرانک
موتورگازی	برای توان بالاتر از ۱ اسب	۰٫۷۳ فرانک

از نظر مقایسه، بهای «موتور انسانی» برابر ۶/۲۵ فرانک در هر ساعت برای انجام دادن همان کارها بود.

بنابراین، گویا الکتروموتور محکوم بود به اینکه یک دستگاه آزمایشگاهی یا موتوری مناسب برای توانهای کم مناسب ساعتهای برقی، چرخهای خیاطی، خطوط تلگراف، راه‌آهن باقی بماند. در نظر گرفته شده بود که کارگاهها مجهز به یک مرکز انتقال انرژی باشند که یک موتور آبی، ماشین بخار یا موتور گازی انرژی آن را تأمین کند. توزیع انرژی همیشه به‌کمک فلکه و تسمه برای هر ماشین انجام می‌گرفت. هنوز هیچ علاقه‌ای به تغییر شکل انرژی هیدرولیک یا انرژی گرمایی به الکتریسیته و عمل معکوس برای بازیابی انرژی مکانیکی دیده نمی‌شد. در این زمان هنوز روشن‌سازی، گالوانوپلاستی و تصفیهٔ مس تنها کاربردهای مهم الکتریسیته باقی‌مانده بودند.

این مشکل بایستی در زمانهای دیگری مطرح می‌شد و استعداد فراوان کسانی مانند ایپولیت فونتن، مارسل دپره و ادیسن توانستند آن را حل کنند.

نخستین پیشنهاد مؤثر، توجه کردن به انرژی هیدرولیک به‌عنوان سرچشمهٔ انرژی بود. کاربرد توربینهای گوناگون در سیستمهای مبتنی بر جریانهای آب، با همان تنوع آبشارها و شیبهای رودخانه‌ها در آن روزگار بسیار رایج بود. همچنین قرار دادن یک ژنراتور در تأسیسات هیدرولیکی و انتقال جریان برق آن به فواصل نزدیک بمنظور تغذیه موتورها کار نسبتاً آسانی بود. این موتورها، ماشینهای گوناگون: ماشینهای ابزار، پرسهای چاپ، چرخهای خیاطی و اورگ‌ها را فعال می‌ساختند و در ضمن می‌توانستند حمام گالوانوپلاستی یا یک مدار روشن‌سازی را تغذیه کنند. حوادث برخاسته از «زیاد شدن جریان» که این کاربردها را محدود کنند، پیش نیامدند.

همچنین گویا عقیده داشتند که نباید بگذاردن مولدهای کوچکی که با بخار می‌گردند و با نیاز محلی تناسب دقیقی دارند بسنده کنند بلکه بهتر این است که دینامهای پرقدرتی ساخته شوند تا دستگاههای متعددی را تغذیه کنند. اما پیش از تعمیم چنین سیستمی که بهای برق را کاهش می‌دهد، مسائل فراوانی باید حل شوند.

مسألهٔ بازده الکتروموتورها: بحث بازده موتورها مسألهٔ بسیار ظریفی است. مفهومی که در ابتدا از آن داشتند برخاسته از نوعی تحلیل نارسای شرایط کار و تفسیری بیراه اما بسیار رایج بود که آن را قانون یاکوبی می‌نامیدند.

دیدیم که در ۱۸۳۸، آقای هرمان فون یاکوبی به مناسبت آزمایشهایش در حرکت دادن قایقی با موتور برقی اظهار داشت که شدت جریانی که از موتور می‌گذرد در فاصلهٔ لحظه‌ای که

قرقره‌های متحرک به باتری پیلها وصل می‌شود و زمانی‌که کار مکانیکی ایجاد شده توسط چرخ محرک به‌حداکثر می‌رسد، به نسبت ۲ به ۱ کاهش می‌یابد. از این قانون چنین نتیجه گرفته شد که در اثر القای ایجاد شده به‌علت جابه‌جایی بوبینها در میدان الکترومغناطیسی ثابت، نوعی نیروی «برق‌وارانی» در بوبینها پدید می‌آید. این نیرو با نیروی پیلها مقابله می‌کند و شدت جریان را کاهش می‌دهد. توان در دسترس، تنها نیمی از توان باتری است و نیم دیگر آن تلف می‌شود.

فهم این نکته که چرا این قانون که شرایط توان بهینه را مشخص می‌سازد بوسیلهٔ برخی از معاصران به‌عنوان قانون مربوط به بازده تفسیر شده است، دشوار می‌نماید. این آقایان با مخلوط کردن توان با بازده، چنین نتیجهٔ گرفتند که بازده هر موتور برقی نمی‌تواند از ۵۰٪ فراتر رود. چنانچه اتلاف نیروها را در اصطکاک، گرم شدن و جریانهای فوکو در نظر بگیریم مقدار بازده از این‌هم کمتر خواهد شد.

این اشتباه گویا در سال ۱۸۷۹ بوسیلهٔ آقای آخارت تصحیح شد. وی ثابت کرد که زمانی‌که توان یک الکتروموتور به‌سوی حداکثر گرایش دارد؛ بازدهٔ آن، به صفر میل می‌کند. در همان سال ایرتون برای بالا بردن بازده فراتر از ۵۰٪ روشی را بنیاد گذارد. تلفات تابع شدت جذب شده هستند، بنابراین، کافی است که با نگهداری مقدار توان، شدت را کاهش دهیم، این نتیجه‌گیری را می‌توان با انتخاب سرعت بسیار زیاد دوران به‌دست آورد زیرا این کار مقدار نیروی برق‌وارانی را افزایش می‌دهد و برای این کار لازم است تحریک القاگرها را به‌طور جدا از یکدیگر تنظیم کرد. توان برقی، برابر حاصلضرب شدت در نیروی برق‌وارانی است و چنانچه کاهش مقدار یکی از ضرایب با افزودن مقدار دیگری جبران شود به نتیجه خواهیم رسید. با در نظر گرفتن روابط گسترده ایرتون، آقای اوپیتالیه[1] می‌پرسد که «چه کسی می‌تواند ادعا کند که اولین نفر است؟»

تفوق جریان مستقیم: تا سال ۱۸۹۰ تنها با موتورهای جریان مستقیم آشنا بودند. در این دوره چندین عامل به سود جریان مستقیم بود: گشتاور راه‌اندازی قوی، بویژه چنانچه از تحریک زنجیری استفاده می‌شد؛ تغییر سرعت گردش با ایجاد فرجه جاروبکها روی کلکتور؛ معکوس کردن جهت دوران بوسیلهٔ کموتاتور، گرچه روی یک خط جریان متناوب، امکان کار یک موتور کلکتوردار وجود داشت. این کاربرد بسیار محدود بود زیرا همین‌که توان به چهار تا پنج اسب می‌رسید جابه‌جاگری بسیار بد انجام می‌گرفت. چنانچه کلکتور حذف می‌شد دشواری دیگری پیش می‌آمد. یک موتور سادهٔ جریان متناوب در لحظهٔ راه‌اندازی باید با دست یا با یک موتور فرعی گردانیده می‌شد.

1. Hospitalier

حدود سال ۱۸۹۰ بود که با کارهای گالیلئو فراری،نیکلا تسلا[1] و دالیوو- دابروولسکی[2] با به‌کارگرفتن جریان چند فازی، این دشواریها برطرف شد. گرچه از همان زمان ساخت، موتورهای جریان متناوب، ساده‌تر و بنابراین با صرفه‌تر بودند موتورهای جریان مستقیم تا مدتها بعد، به‌کارگرفته می‌شدند.

در چند رشته کاری این موتور عملاً حریفی نداشت: کشیدن واگنهای راه‌آهن، تراموای و واگنهای کابلی، موتورهای بالابر (آسانسورهای ساختمانها و معادن). در واقع این موارد، نخستین کاربردهای موتورهای برقی بودند.

باز بدلیل دیگری، این بخش نمی‌توانست به سود همه جریانهای گوناگون باشد. این شبکه‌ها در مجموع، بخصوص برای توزیع جریان مستقیم مجهز شده بودند. باز باید گفت که در سال ۱۹۰۰ جریان مستقیم بسیار بیشتر از جریان متناوب هواخواه داشت: در فرانسه ۲/۳ و در پاریس ۳/۴. اگر در آلمان برق سه فازی، که در این کشور آغاز شد، به سود جریان متناوب عمل کرد، در انگلستان وضع به‌گونه‌ای دیگر بود. در این کشور به‌علت نبودن سرچشمه‌های آبی، تنها از انرژی گرما استفاده می‌شد که در جنب خود محلهای مصرف تولید می‌شدند و بخصوص معادن از جریان مستقیم بهره می‌گرفتند. در امریکا، در ۱۹۰۱ در شهرهای بزرگ و پرجمعیت، شبکه‌های جریان مستقیم تفوق داشتند. جریان متناوب برای انتقال انرژی و توزیع آن در حومهٔ شهرهای بزرگ و کوچک تولید می‌شد. در نیویورک در سال ۱۹۰۲ حدود ۳۰۰۰ آسانسور و بالابر موتوری با جریان مستقیم دربرابر تنها ۳۰۰ وسیلهٔ موتوری با جریان متناوب فعال بودند.

سرانجام باید تا ربع دوم سدهٔ بیستم به انتظار نشست تا موتورهای با جریان متناوب هماهنگ با جهشی در توسعهٔ شبکه‌های توزیع، کاربردی عمومی یابند.

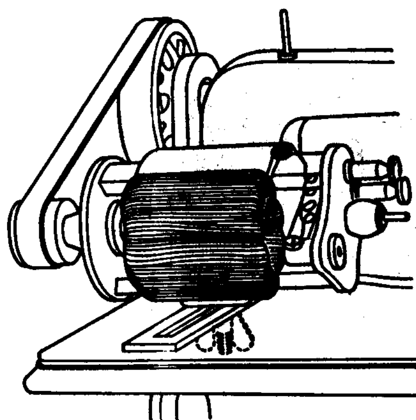
نخستین الکتروموتورها: دیده شد که آزمایشهای الکتروموتورها از مدتها پیش آغاز شد، اما در اواخر سالهای ۱۸۷۰ بود که تکمیل دینام گرام و زیمنس راه ساخت موتورهای واقعاً قابل استفاده را عملاً باز کرد. در سال ۱۸۷۳ گرام نوعی موتور دینامی چهار قطبی و چهار جاروبکی ساخت که الگوی آن دینام به‌اصطلاح هشت‌گوش خودش بود، اما به عللی که قابل درک است این موتور، کاربردی نیافت.

نخستین موتور با توان کم برای چرخهای خیاطی ساخته شد. در سال ۱۸۲۹ آقای مارسل دپره

---

۱. N.Tesla (۱۸۵۶-۱۹۴۳): فیزیکدان یوگوسلاو.

۲. Dolivo-Dobrowolsky، میخاییل اوسیپوویچ (۱۸۶۲-۱۹۱۹): دانشمند روسی الکتروتکنیک؛ تولد ۱۸۶۲ و مرگ ۱۹۱۹



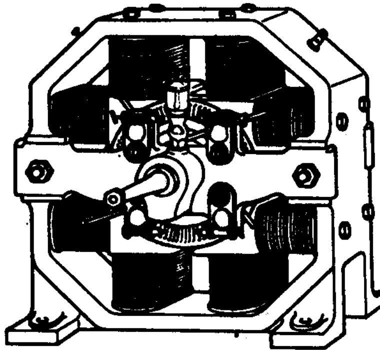
شکل ۳۴.موتور گریس‌کام (در یک چرخ خیاطی).
القاگیر کاملاً در القاگر، که تنها در شکل دیده می‌شود،گنجانیده شده است القاگیر دو T شکل زیمنس است.
قطبهای القاگیر کمی خارج از مرکز و به طرف وسط قوز کرده‌اند.

موتورهای کوچکی ساخت که ۳۰۰۰ و ۵۴۰۰ دور در دقیقه می‌گردیدند. القاگر این ماشینها یک آهنربا دائمی بود که هشت تیغه داشت. بوبین القاگیر را یک باتری دارای هشت پیل بونزنی تغذیه می‌کرد. دیده می‌شود که در آن زمان این وسیله بیشترین تحول را داشته است: کاربرد آهنرباهای دائم، نبودن شبکهٔ توزیع، تولید برق با روش کاملاً کلاسیک با پیلهای شیمیایی. این تجهیزات در آن زمان صرفاً تجربی بودند.

دستگاههای دیگری از این قبیل ساخته شد، از قبیل موتور دیل[1] در ۱۸۸۰؛ ماشین امریکایی گریس‌کام[2]؛ انگلیسی ایرتون و پرّی در همان زمان. تنها موتور دیل دارای یک حلقه گرام بود. این موتور یک کلکتور شعاعی داشت تا کمتر فضاگیر باشد، القاگیر آن با جاروبکها می‌گردید. این مکانیسم بعدها در مقیاس بزرگی جهت ساخت یک مولد نیرومند به‌اصطلاح «بدون کلکتور» و چگالی زیاد به‌کار گرفته شد. بقیهٔ موتورها با القاگیرهای ماکویی، تیرآهنی، زیمنس با چند تغییر در شکل آن ساخته شدند (شکل ۳۴).

در پایان باید از تحقیقات گوستاو ترووه[3] از ۱۸۸۰ تا ۱۸۸۳ نام برد که دنبالهٔ کارهای پیشینیان وی بوده است. در موتورهای کوچک وی هیچ چیز تازه‌ای نبود، اما بد نیست توجه دهیم که آقای

1. Diehl 2. Griscom 3. G.Trouvé



شکل ۳۵.موتور هشت‌گوش گرام.
در صفحات دو قطر جابه‌جاگر چهار مغناطیس برقی و چهار جاروبک دیده می‌شوند.

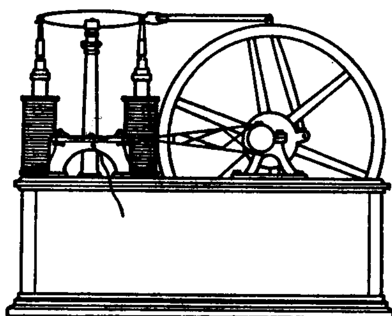
تروِوِه در به‌کارگرفتن الکتروموتورهای برای حرکت دادن انواع خودروها، موتورسیکلتهای سه‌چرخی، که وزن آکومولاتور آن بسیار زیاد بود، قایق و بالاخره بالون هدایت‌شونده پیشگام بوده است. ترووه در سال ۱۸۸۱ با یکی از موتورهای خود یکی از بالونهای هدایت‌شوندهٔ گاستون تیساندیه[1] را از زیر طاق کاخ صنعت (پاله دو لندوستری) هدایت کرد. دو سال پس از آن با همان موتور یک پرواز آزمایشی انجام داد. این موتور ۱/۵ اسب توان داشت. اما مانع اصلی باز هم وزن آکومولاتور پلانته بود. آزمایشهای بعدی آقایان رنار و کربس[2] با موتوری که دارای ۸/۵ اسب توان و مجهز به حلقهٔ گرام بود به‌همین‌دلیل دنبال نشد.

موتورهای گرام: موتوری که مدت بیست سال برای توانهای بالا ساخته می‌شد، از آغاز دههٔ ۸۰، همانا موتور گرام دارای کلکتور بود. این نوع موتور را در آغاز، به مناسبت شکل بدنهٔ آن، هشت‌گوش می‌نامیدند؛ چهار قطب و دو مدار مغناطیسی داشت (شکل ۳۵). در واقع این موتور هشت هستهٔ قطبی داشت که هرکدام از آنها دارای قرقره‌های تحریک‌کنندهٔ خاص خود بودند که جفتی تنظیم شده بودند. آقای ادیسن چند سال بعد این مکانیسم را، که از قرقره‌های سنگین آسوده بود، برای مولدهای بزرگ نخستین خود که ۱۲۵ اسب توان داشتند، اقتباس کرد.

القاگیر این ماشینها به‌جای دو، چهار خط جاروبک داشت. و این، نوآوری مهمی بود که راه را برای ساخت ماشینهای چندقطبی هموار کرد.

۱. G.Tissandier (۱۸۴۳ـ۱۸۹۹): فضانورد فرانسوی.

2. Krebs



شکل ۳۶. الکتروموتور بوربوز (Bourbouze) (۱۸۶۵)، با پیستونهای شناور در این الکتروموتور، تأثیر ساختمان ماشین بخار با سیلندرهای عمودی، حتی به‌شکل شاهنگ دیده می‌شود.

در سال ۱۸۷۹ چنین موتوری درکارخانهٔ قندسازی سرمواز[1] نزدیک ویتری‌لو فرانسوا[2] کاربردهای گوناگونی یافت: کوبیدن دانه‌ها، وسیلهٔ پخت چغندر، کشیدن خیش تراکتور برای شخم به تاسی از نمونهٔ آزمایشی چند سال پیش آنها با لوکوموبیل. این کارها با وسایل آن روزگار به نتیجهٔ قطعی نرسیدند اما نوعی پیش آگهی استفاده از الکتروموتور بود که در دو دهه بعد پیشرفت کرد.

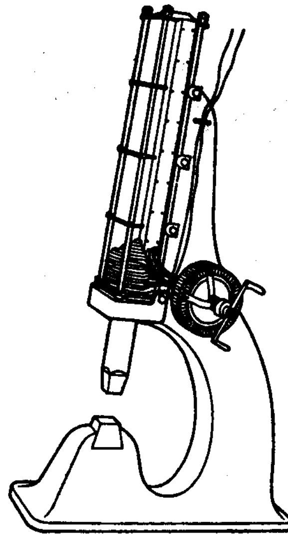
موتورهای با حرکت خطی: جالب است بدانیم که موتورهای با حرکت خطی از همان سالهای نخست، ساخته و آزمایش شده بودند، درحالی‌که موتورهای دورانی، نظیر همه آنچه که تاکنون از آنها نام رفته است، چنین نبودند.

موتورهای دارای پیستون غوطه‌ور ساخت چارلز پیج و بوربوزکه رواج ناپایدار آنها را درگذشته دیده‌ایم حرکت خطی داشتند (شکل ۳۶). اما بهترین نمونهٔ ساخته شدهٔ آنها، چکش هاونی الکترومغناطیسی آقای مارسل دپره بود که در حوالی سال ۱۸۸۰ چند نمونه از آن را ساخت (شکل ۳۷). این چکش، یک مغناطیس سنگین برقی با محور عمودی داشت که قسمتهای مطبق آن را مکانیسمی کمکی پیاپی فعال می‌ساخت. بنابراین، هستهٔ غوطه‌وری که حامل چکش بود می‌توانست تا ارتفاع زیادی، حدود دومتر، بالا برده شود. کلیدی در پایان حرکت، تحریک را قطع می‌کرد و جرم چکش با سقوط آزاد پایین می‌افتاد.

آقای زیمنس در ۱۸۷۹ مته‌ای برای معادن ساخت که حرکت رفت و برگشتی کلنگ آن بدون دخالت کموتاتور (جابه‌جاگر) بود و برای این کار روی قرقرهٔ دارای جریان مستقیم قرقرهٔ دیگری

1. Sermoize

۲. Vitry-le-François: ناحیه‌ای در ایالت مارن فرانسه، کنار رودخانهٔ مارن.



شکل ۳۷.چکش هاونی الکترومغناطیسی مارسل دپره.
صد قرقره تخت با ضخامت یک سانتیمتر برروی‌هم قرار دارند و به‌شکل قرقره‌های دینام با یکدیگر متصل شده‌اند. دو جاروبک که میل لنگی آنها را حرکت می‌دهد، مجتمعاً گروه ده عددی تیغه‌های کلکتور قرقره‌ها را می‌پوشانند. لبه‌های این ده تیغه، چکش ساخته شده از آهن نرم را، در استوانه بالا می‌برند. قطع جریان برق، سقوط سریع چکش را درپی دارد.

گذاشته شده بود که جریان متناوبی با بسامد کم آن را تغذیه می‌کرد. چندی نگذشت که از سیستم الکترومکانیکی برای فرمان دادن به علامتهای راه‌آهن استفاده شد. در سال ۱۸۹۱ آقای اشتروگر[1]. نخستین کموتاتور خودکار را برای تلفن ساخت، که در مجلد پنجم این مجموعه از آن یاد خواهیم کرد.

نباید از یاد برد که فرمان الکتریکی آونگها و ساعتها را آقای نوله در سال ۱۸۵۱ ساخت. این فرمان با توان بسیار کمی فعال می‌شد و تحت تأثیر ساعت مرکزی زمان را نشان می‌داد. ساعت مرکزی با مکانیسمهای اختراعی در سالهای ۱۸۶۰ به توسط آقایان برگه، گارنیه[2]، میلده[3]، استانیسلاس فوریه و غیره، حرکات را به ساعتهای پیرو انتقال می‌داد.

1. Strowger 2. Garnier 3. Milde

انتقال برق

پس از نخستین مرحلهٔ پیدایش برق صنعتی که سالهای ۶۰ و ۷۰ را دربر می‌گیرد می‌توان دید که مرحلهٔ دوم از آغاز سالهای ۸۰ تا حدود ۱۹۰۰ ادامه داشته است. از مشخصات این مرحله، آزمایشهای اولیهٔ مربوط به انتقال نیرو و به‌کار گرفتن جریانهای چند فازی است.

تا آن زمان برای هر کار، مدارهای برقی میان مولدها و محلهای مصرف، بسیار کوتاه بودند و هنوز از تکنیکهای توزیع برق خبری نبود. مولدها نزدیک لگنهای گالوانوپلاستی و در خانه‌های مورد روشنایی کار می‌کردند و در آغاز برای هر چراغ یک مولد وجود داشت. بنابراین موتورهای برقی چندان مورد علاقه نبودند. با وجود بدیع بودن آن و آرزوها و امیدهایی که بیدار کرد، این تکنیک جدید الکتریک، گویا در همان مرحلهٔ تأسیسات فضاگیر و پرخرج و بیهوده، متوقف شد.

آزمایش نخست ایپولیت فونتن در ۱۸۷۳ برای راه‌انداختن مولد گرام بوسیلهٔ یک موتور لنوار و انتقال برق آن به ماشین گرام دیگری بود که در نزدیکی آن قرار داشت. ماشین گرام اخیر در نقش موتور، برای به‌کار انداختن یک تلمبهٔ کوچک مرکزگریز آب بود. خط رابط از دو سیم ۵۰۰ متری تشکیل می‌شد و توانی که انتقال یافته بود به نیم اسب هم نمی‌رسید.

گرچه این آزمایش، تکنسین‌ها و نیز تودهٔ مردم را شگفت‌زده کرد اما هیچ‌گونه پیگیری فوری و مهمی نداشت. اندیشهٔ استفاده از انرژی هیدرولیک در شکل برقی و انتقال آن به محلهای دور مورد نظر، راه خود را به آهستگی تمام می‌پیمود. در سال ۱۸۷۵ آقای نیوده فیزیکدان چنین می‌نویسد: «فهم اینکه چرا مهندسان از این اندیشه، زیاد هیجان‌زده نشده‌اند دشوار است. منابع طبیعی مانند آبشارها و نیروی جزرومد را می‌توان به‌کار گرفت. سد پور ـ آ ـ لانگله[1] روی رودخانه سن (در ایوری)[2] هر روز ۳۰۰۰ اسب توان دارد و صنعت پاریس را می‌تواند تغذیه کند.»

اما در آن زمان از تکنیکهای انتقال فشارهای قوی به فواصل نسبتاً طولانی هیچ نمی‌دانستند. آنان که اطلاع و تجربه‌ای از مصالح نداشتند جز اینکه با روشهای آزمایشی برق را به فواصل کوتاهی انتقال دهند کاری نمی‌توانستند کرد. آقای مهندس کادیا از شرکت وال دوسن[3] دو ماشین گرام را با فاصله ۱۵۰ متر به یکدیگر اتصال داد و با دو سیم به قطر سه میلیمتر ۵۰ کیلوگرم متر را منتقل کرد. در جریان یک شخم‌زنی آزمایشی با برق که در سرمواز انجام گرفت آقای مهندس فلیکس در سال ۱۸۹۷ برق را ۵۰۰ متر انتقال داد. در همان سال آقایان ویلیام تامسن و کارل ویلیام زیمنس

1. Port-á-l'Anglāis

۲. Ivry-Sur-Seine: محلی در ایالت کرتئی، در فرانسه.

3. Val d' Osne

در مقابل پارلمنت انگلستان نشان دادند که چگونه خواهند توانست از انرژی آبشارهای نیاگارا برای استخراج معادن زغال‌سنگ بهره گیرند. اینان توانستند توانی برابر ۲۷ اسب را به‌کمک سیمی از مس با قطر ۱۲٫۷ میلیمتر به مسافت ۵۰۰ کیلومتر انتقال دهند بشرطی که فشاری برابر ۸۰۰۰۰ ولت روی خط باشد.

این ولتاژ در سال ۱۸۹۷ از نظر تئوری عملی نبود اما بخوبی نشان می‌دهد که این اندیشه‌ها که پس از مدت کوتاهی بر دستاوردهای نظری تکیه می‌کردند و نیز پراتیکهای بسیار مشخص، در چه مسیری به پیش می‌رفتند. در ضمن توجه می‌دهیم که آبشار نیاگارا نخستین تجهیزات مولدهای توربینی خود را دقیقاً ۲۰ سال بعد دریافت داشت.

نخستین کارهای دپره: آقای مارسل دپره فیزیکدان فرانسوی بود که در سالهای ۱۸۸۱ ـ ۱۸۸۵ از سد انتقال برق به فواصل دور گذشت. در اوایل ۱۸۸۱ نظریهٔ مربوط به انتقال «انرژی بوسیلهٔ برق» را طبق بیان خود تقریباً در کل آن فرمولبندی کرد. وی برپایهٔ قوانین بنیادی که در پنجاه سال پیش کشف شده بودند جنبه‌های گوناگون مسأله را بررسی کرد و نشان داد که آنها، علی‌رغم منبع انرژی، جملگی به راه‌حلهای مشابهی می‌رسند. یکی از نخستین این نتایج این بود که مرز مشهور بازده هر موتور در ۵۰٪ مرزی پایینتر است و این بازده را می‌توان بالا برد. وی همچنین شرایط نظری مربوط به تأمین توزیع جریان برق در نقاط مختلف مصرف، موتور یا لامپ روشنایی را تعیین کرد.

این مسأله در آن روزگار، بسختی مورد گفت‌وگو بود. گفته می‌شد هرچند که نخستین راه حل از بوتهٔ آزمایش گذشته است، کاربرد یک ژنراتور برای هر واحد مصرف، نه رضایتبخش و نه اقتصادی بود. علاوه‌براین، درکار مولد نقایص بزرگی هم وجود داشت. تغذیهٔ زنجیری یا به‌اصطلاح آن زمان، ولتاژی، برای روشن‌سازی رایجترین سیستم مورد استفاده بود، اما باید تعبیه‌هایی به‌کار می‌رفت تا زمانی که لامپی را از مدار خارج می‌کنند همهٔ مدار قطع نشود. تغذیهٔ موازی برای تنظیم خروجی مولد برحسب نوع مصرف، دشواری بزرگی پدید می‌آورد. می‌توان گفت که مشخصهٔ این دوره تا سال ۱۸۸۱ تشبث سازندگان عمده به انواع مهارتها تعبیه‌ها برای فرار از این دشواریها بود.

تنها کسی که توانست ریشهٔ همهٔ این دشواریها را بیابد و راه‌حلهای نظری تعمیم‌پذیری برای آنها پیشنهاد کند آقای دپره بود. او درکارهای خود با همهٔ روشهای تجربی تخمینی رایج آن زمان، قطع رابطه کرد، او خود پاره‌ای از این تخمینهای غیر علمی را ذکر می‌کند تا دقت محاسبات خود را نشان بدهد. یکی از دشواریهایی که همواره با هر بحث جدی مقابله می‌کرد، اثر زیانبخش فاصله بود. پس از آزمایشهای سرمواز، که درگذشته از آن یاد شد و آزمایشهای دیگری که در نوازیبل (در

سن ـ ا ـ مارن) در شکلات‌سازی ژول منییه[1] انجام گرفت این اندیشه پیش آمد که به قطر سیمها باید به تناسب فاصله افزوده شود. معلوم است که چه نوع استدلالی توانسته است به چنین نتایجی برسد.

بعضی ارقام شگفت‌انگیز، گاهی کاملاً من‌عندی، ذکر می‌شدند که سبب دلسردی همهٔ تأسیسات مهم می‌شدند. مثلاً در امریکا محاسبه شده بود که «برای انتقال نیروی کار آبشار نیاگارا به محلهای دور، مقدار مس مورد نیاز از ذخایر مس معادن دریاچه سوپریور بیشتر است». آقای دپره می‌افزاید: «بدین‌ترتیب من ظاهراً این افتخار را داشتم که حقیقتی را، که این‌همه بد فهمیده شده بود، ثابت کنم (که بازده خط ربطی به طول آن ندارد).» این حقیقت «با ناباوری بسیاری حتی از سوی الکتریسینها» برخورد شد.

وانگهی زمانی‌که این حقیقت پذیرفته شد محافل صلاحیتدار در خوش‌بینی افراط کردند. کارشناسان انگلیسی و امریکایی با محاسبه بدین نتیجه رسیدند که برای توزیع انرژی کامل همین آبشارهای نیاگارا در سراسر جهان، تنها کابل با قطر ۱۳ میلیمتر کفایت دارد. اما دپره بی‌درنگ حساب کرد که این انرژی که شاید بیش از دو میلیون اسب بخار باشد، با در نظر داشتن انواع مقاومتهای احتمالی خطوط و دستگاهها، باید فشاری برابر یک‌ونیم میلیون ولت را تحمل کند تا در فاصلهٔ ۷۵ کیلومتری تنها ۵۰٪ بازده داشته باشد. در این دوران چنین ولتاژی سبب وحشت حتی خود دپره شد. حال که چنین است، چرا باید از سیم با قطر ۱۳ میلیمتری استفاده کرد و نه از سیم تلگرافی ۴ میلیمتری؟ وی نوشته است: «بالا بردن کم ولتاژ منبع، هزینهٔ چندانی ندارد و زمانی‌که با میلیونها ولت سروکار داریم تردیدی برای این هزینهٔ کم خطاست.»

اگر اصراری باشد که بدانیم چرا آقای دپره تصمیم به حل مسألهٔ انتقال برق گرفت باید بگوییم که دخالت وی در این قضیه بمنظور برداشتن سدی بود که با آنچه که آقای گرام ده سال پیش فرصت حل آن را یافت شباهت بسیار داشت. وانگهی، در تاریخ صنعت وجود چنین موانعی فراوان دیده شده است. می‌توان آن را با کارهای وات برای ماشین بخار، استیونسن برای لوکوموتیو، و اوتو برای موتورگازی و سرانجام آقای بل برای تلفن مشابه دانست. استمرار تحول صنعت، حتی در روزگار ما هم، تنها یک نمود است.

آقای دپره که فروتنی بیشتری از بعضی معاصران خود داشت، و جسورتر از برخی دیگر بود با محاسبه ثابت کرد که با دو ماشین گرام از نوع C «انتقال یک کار مفید ۱۰ اسب به فاصله ۵۰ کیلومتری بوسیلهٔ یک سیم معمولی تلگراف ممکن است، بشرط اینکه نیروی اولیهٔ آن حدود ۱۶

1. Jules Menier

اسب باشد.» بعدها وی پس از انجام آزمایشهای نخستین خود، نشان داد که با فشاری «معقول» انرژی برقی را می‌توان با بازده ۵۰٪ به فاصله ۳۵۰ کیلومتری انتقال داد؛ انرژی گرفته شده بوسیله خط بعدی را نیز می‌توان با همان بازده به همان فاصله منتقل ساخت. بنابراین، در فاصلهٔ ۷۰۰ کیلومتری، ۲۵٪ انرژی نخستین را خواهیم داشت: در اینجا تصریح می‌کنیم که این درصد، بازده همهٔ تأسیسات انتقال برق است نه بازده یک موتور تنها. شهر پاریس هم می‌تواند از انرژی آبشارهای کوههای آلپ یا نیروی جریان رودخانهٔ بزرگ راین تغذیه شود و هم از انرژی جریانهای کشندی اقیانوس.

آغاز تجربه‌ها: آغاز کارهای دپره در سال ۱۸۸۱ بدین علت بود که در این سال در پاریس یکی از نمایشگاههای متعدد برق این زمان جریان داشت. نوآوریها سریع بودند و هر یک از آنها توجه زیادی را به خود معطوف می‌داشت. این توجه هم ازسوی تودهٔ مردم و هم بوسیله کارشناسان آشکار بود، وسایل نخستین که برای روشن‌سازی خانه با برق ساخته شدند با مشکلات تبعی انتقال و توزیع جریان برق روبه‌رو بودند. آقای دپره سیستمی برای توزیع پیشنهاد کرد که در برابر سیستمهای مورد نظر اشخاص متعدد دیگر، از جمله آقایان ادیسن و براش قرار داشت. در سیستم دپره، مولد به‌کمک سیستم ویژه‌ای از تحریک الکترومغناطیسی، خود را تنظیم می‌کرد. وی بدین‌ترتیب درستی نظرات خود را با عمل ثابت کرد و مدار گسترده‌ای را تغذیه کرد که در آن کارگاههای بسیاری با دستگاههای گوناگون با اتصال موازی فعال می‌شدند.

اما این نخستین نمایش برای متقاعد کردن اشخاص بدبین کافی نبود. این نمایش در آغاز سال بعد با تجربه‌ای که در کنسرواتوار پیشه و هنر روی یک خط ۸۰۰ اهمی هم‌ارز فاصله‌ای برابر ۸۰ کیلومتر صورت گرفت، کامل شد برپاکنندگان نمایشگاه برق در همان سال، ۱۸۸۲ در مونیخ به وی فرصت دادند تا آزمایش جالبتری را انجام دهد. یک صنعتگر باواریایی کارخانهٔ خود را در میسباخ[1] در اختیار وی گذاشت تا یک دینام گرام که توربینی هیدرولیکی آن را می‌گرداند در آنجا قرار دهد. در این آزمایش جریان برق می‌بایست حدود ۵۰ کیلومتر منتقل شود. این خط از یک سیم تلگراف تشکیل می‌شد و پایان آن، کاخ نمایشگاه بود. این خط یک موتور برقی را تغذیه می‌کرد که آن نیز بنوبهٔ خود یک تلمبهٔ هیدرولیک با توان تنها ربع اسب را به‌کار می‌انداخت. بازده این انتقال از ۳۹٪ کمی پایینتر بود. حوادث متعددی نزدیک بود این آزمایش را مختل کنند. اما آزمایش نشان می‌داد که این انرژی می‌تواند به‌شکل جریان برقی به فاصله‌ای که در آن روزگار چشمگیر می‌نمود انتقال یابد.

1. Miesbach

نمایشهای تعیین‌کننده: آقای دپره در سالهای بعد نتایج به‌دست آمده در مونیخ را با آزمایش تازه‌ای که در ماه فوریه در ایستگاه راه‌آهن شمالی انجام داد تأیید کرد. در این آزمایش مولد و موتور پهلوی یکدیگر گذاشته شده بودند اما دو تا از بستهای اتصالی آنها را حلقه‌ای که از لو بورژه[1] می‌گذشت به یکدیگر اتصال می‌داد کاری که مستلزم اتصال دو سیم به طول ۸/۵ کیلومتر است. دو بست اتصالی دیگر مستقیماً به‌هم متصل شده بودند.

آقای دپره به مشخصات مکانیکی این مولد توجه خاصی مبذول می‌داشت. به یاد آوریم که وی نخستین کسی بود که برای این دستگاهها نظریه‌ای ریاضی ارائه داشت. بدین‌ترتیب، وی عناصری را که برای محاسبهٔ تولید نیروهای برقرانی زیاد لازم بود در اختیار داشت. وی ماشین خود را به حلقهٔ گرام و دو کلکتور مجهز ساخت، و بنابراین، با اتصال زنجیری می‌توانست به ۲۷۰۰ ولت (۶۰ اسب توان) دست یابد. این موتور پنج اسب توان داشت. این نیرو در انتقال به‌هنگام آزمایش از ۰/۲۵ به ۴/۵ اسب و بازده انتقال از ۳۰ به ۴۸٪ تغییر کرد.

در پایان، دپره با انجام یک ردیف آزمایشهایی که در سال ۱۸۸۳ بین ویزی[2] و گرنوبل و در سال ۱۸۸۵ بین پاریس و کری[3] به‌عمل آورد به همهٔ تردیدها دربارهٔ امکانات انتقال جریان برق پایان داد. آزمایش نخست تکرار آزمایش پیش اما در فاصلهٔ بیشتر، ۱۴ کیلومتر، بود و در نمایشگاه سال ۱۸۸۱ ارائه شد. این جریان که از یک کارخانهٔ هیدرولیکی ویزی انتقال یافته بود، در گرنوبل نخست یک تلمبهٔ کوچک، مانند مورد مونیخ، را به‌کار انداخت، سپس دو مولد را، که در همان‌جا الکتروموتورهایی را تغذیه می‌کردند که چند ماشین‌ابزار، دستگاه خراطی، ارهٔ مجمعه (دیسکی)، پرس چاپ و بالاخره یک مدار روشن‌سازی با ۱۰۸ لامپ روشنایی ادیسن را به‌کار انداختند.

در آزمایشهای بین پاریس ـ لاشاپل و کری، راه‌آهن شمالی فرانسه بخشی از هزینهٔ آن را، وروچیلد بانکدار بخش دیگر آن را متقبل شده بود. این آزمایشها طبق برنامهٔ دقیقی انجام یافتند که مثلاً انتقال جریان با ولتاژ ۶۰۰۰ در آنها پیش‌بینی شده بود. در این آزمایشها، مانند آزمایش گرنوبل به‌جای یک سیم معمولی تلگراف از سیمی استفاده شد که از مفرغ سیلیسیم‌دار بود. برای پرهیز از حوادثی نظیر آنچه که در تجربهٔ نخستین مربوط به ایستگاه راه‌آهن شمالی اتفاق افتادند ـ جرقه‌زنی بستهای اتصال با جرم (اتصال به زمین) در اثر بروز ولتاژ اضافی، که منجر به مرگ پل کورنو فیزیکدان شد ـ می‌بایست مسأله عایق‌سازی این بستها حل می‌شد. این آزمایشها روی‌هم‌رفته بیش

---

۱. Le Bourget: محلی در شهرستان سن‌ـ‌سن‌دنی واقع در شمال پاریس.

۲. Vizille: محلی در شهرستان ایزر، از ایالت گرنوبل.

۳. Creil: محلی در شهرستان اواز، کنار رودخانهٔ اواز.

از یک سال ۱۸۸۵ ـ ۱۸۸۶ به درازا کشید تا دقت کار خط، مطمئن و تعهدات آقای دپره عمل شده باشد. اما پس از گذشت چهار سال کار نظری و آزمایشهای واقعی، هنوز دشواریهای گوناگونی وجود داشت که باید مرتفع می‌شدند، گرچه لااقل از نظر تودهٔ مردم و کارشناسان، وی موفق شده بود.

شرکت گرام بنوبه خود درخواست کرد که توانایی وی در این زمینه به ثبوت برسد، زیرا همهٔ کارهای دپره با مولدهای طرح آن شرکت انجام گرفته بود. عملاً چهار دینام گرام که با اتصال زنجیری به یکدیگر مربوط می‌شدند و روی‌هم‌رفته ۵۹۰۰ ولت تولید می‌کردند در پایان خط، در فاصلهٔ ۵۷ کیلومتری، سه ماشین مشابه را که آنها هم با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند به‌عنوان موتور فعال می‌ساختند. بازده این انتقال ۵۰٪ بود، یعنی در همان حدودی که دپره به‌دست آورده بود.

با این‌حال، چنین می‌نماید که در بخش جریان مستقیم به مرزهای این تکنیک دست یافته بودند. یک کلکتور دینام نمی‌توانست ولتاژی بالاتر از ۳۰۰۰ ولت را تحمل کند. وانگهی مسألهٔ عایق‌سازی بستهای اتصالی دینامهای پایانی یک تسلسل زنجیری، در بالاتر از ۶۰۰۰ ولت لاینحل می‌نمود.

سیستم انتقال رنه توری: به دورانی رسیده بودند که ترانسفورماتورهای لوسین گولار[1] وگیبس بتازگی درکارآمده بودند و بنابراین، راه برای به‌کارگیری جریانهای متناوب باز شده بود و برای تولید ولتاژهای بالا با وسایل نسبتاً ساده امکاناتی به‌دست آمده بود.

با این‌همه، با اینکه کارهای اولیه در این زمینه را آقایان دالیوو ـ دابروولسکی و براون (مهندسی از ژنو) انجام داده بودند، آقای توری توانست عصر انتقال جریان مستقیم را ادامه دهد.

در ماه مهٔ ۱۸۹۰ شرکت صنایع برق ژنو در شهر ژنوا مداری از توزیع برق مستقیم به طول ۴۸ کیلومتر با ۱۲۰۰۰ ولت فشار برای ۱۰۰kW قدرت، مطابق سیستم توری برقرار کرد. همین شرکت تأسیسات دیگری از همین نوع در جاهای دیگر برپا ساخت و این تنها شرکتی بود که در زمانی‌که این تکنیک به‌سوی کاربرد جریانهای متناوب پیش می‌رفت، بدین کار دست زد. در همان سال مدار لا شو ـ دو ـ فون[2] در سویس به طول ۵۶ کیلومتر و با فشار ۲۲۰۰۰ ولت برقرار شد.

در سال ۱۹۰۶ شاهد برقراری خطی به طول ۱۸۰ کیلومتر برای برق‌رسانی به شهر لیون می‌باشیم، خطی که بیش از سی سال فعال بود. مشخصات این خط دو بار تغییر کرد.

1. L. Gaulard 2. La Chaux-de-Fonds 3. Plombieŕe

جریان این برق در کارخانهٔ پلومبیر[3] واقع در موتیه[1] با کمک آبشاری از ایزر حدود ۶۵ متر که ۶۳۰۰ اسب ایجاد می‌کرد، تولید می‌شد؛ این خط زیر فشار ۵۷۶۰۰ ولت بود. مولدهای این خط با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند و ولتاژ آنها را با تغییر فرجه جاروبکها، تنظیم سرعت توربین یا تغییر تعداد مولدها، کم و زیاد می‌کردند. آقای توری در واقع با استفاده از اندیشه‌های گرام و کابانلا[2] وسیلهٔ ثابت نگاهداشتن شدت جریان در ۷۵ آمپر و تغییر ولتاژ را ساخته بود. برروی‌هم چهار توربین، شانزده دینام را فعال می‌ساختند.

جزئیات مهم و متعدد این تأسیسات با دقت تهیه شدند: عایق‌سازی زمین گروه ژنراتورها، کلیدهای ویژه‌ای که بوسیلهٔ آنها می‌توانستند در صورت تغییر جهت گردش توربین، جریان برق هر گروه و نیز هر دینام را قطع کنند (کوپلونگ تاشونده یک دینام برای کار موتوری آن می‌تواند خطرناک باشد)؛ امکان ایجاد اتصال به زمین میانه مدار قدرت و غیره.

خط هوایی به یک خط زیرزمینی به طول دو کیلومتر وصل می‌شد تا به مرکز شهر راه یابد. ولتاژ خط در ورود به شهر بوسیلهٔ کموتاتورهایی به ۶۰۰ ولت کاهش می‌یافت که ولتاژ متناسب توزیع در شبکه تراماواهای لیون بود. یک پست فرعی در میانهٔ خط ساخته شده بود که دارای سه کموتاتریس (تبدیلگر گردان) برای تبدیل جریان مستقیم به متناوب و تهیهٔ جریان سه فازی برای شرکت نیرو و روشنایی گرنوبل بود. در موارد لزوم کار این کموتاتریس‌ها معکوس می‌شد و جریان سه فاز خط ثانوی به جریان مستقیم برای مصرف شهر لیون تبدیل می‌شد.

برتریهای این مجموعه در سادگی تأسیسات آن و فرمانهای مربوطه بود. نتایج آن چنان رضایتبخش بود که کاربرد آن نه‌تنها ادامه یافت بلکه حتی در دوره‌ای که مشکلات اولیهٔ مربوط به انتقال جریان متناوب، بسرعت و گستردگی برطرف می‌شدند، رواج گرفت.

بین سالهای ۱۹۱۱ تا ۱۹۱۷ شدت جریان را دو برابر کردند و به ۱۵۰ آمپر، و فشار را به ۱۰۰۰۰۰ ولت رسانیدند. گروههای مولدهای جدیدی که در هر کلکتور ۴۰۰۰ ولت می‌دادند ساخته شدند. کارخانه‌های متعددی در طول مسیر این خط برپا شدند و برای اتصال خط با این کارخانه‌ها ابزارهای بدیعی اندیشیده شد. اصلاحات دیگر، بویژه کاربرد دینامهای ۷۵۰۰ ولتی، در سالها ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۹ انجام گرفت. در سال ۱۹۳۶ فشارکاری به ۱۲۵۰۰۰ ولت و مقدار مصرف برای شدت ثابت ۱۵۰ آمپر به ۱۸۰۰۰kW رسید. تنها غم همسانی با دیگر شهرها بود که سبب شد لیون جریان مستقیم موتیه را، که جریان مستقیم مورد استفاده در فرانسه بود، رها سازد.

---

۱. Moutiers: محلی در ساووا، که در کوههای آلپ شمالی فرانسه، هم‌مرز با ایتالیا و سویس است.

2. Cabanellas

حدود سال ۱۸۹۰ بود که با کارهای گالیلئو فراری،نیکلا تسلا[1] و دالیوو- دابروولسکی[2] با به‌کار گرفتن جریان چند فازی، این دشواریها برطرف شد. گرچه از همان زمان ساخت، موتورهای جریان متناوب، ساده‌تر و بنابراین با صرفه‌تر بودند موتورهای جریان مستقیم تا مدتها بعد، به‌کار گرفته می‌شدند.

در چند رشته کاری این موتور عملاً حریفی نداشت: کشیدن واگنهای راه‌آهن، تراموای و واگنهای کابلی، موتورهای بالابر (آسانسورهای ساختمانها و معادن). در واقع این موارد، نخستین کاربردهای موتورهای برقی بودند.

باز بدلیل دیگری، این بخش نمی‌توانست به سود همه جریانهای گوناگون باشد. این شبکه‌ها در مجموع، بخصوص برای توزیع جریان مستقیم مجهز شده بودند. باز باید گفت که در سال ۱۹۰۰ جریان مستقیم بسیار بیشتر از جریان متناوب هواخواه داشت: در فرانسه ۲/۳ و در پاریس ۳/۴. اگر در آلمان برق سه فازی، که در این کشور آغاز شد، به سود جریان متناوب عمل کرد، در انگلستان وضع به‌گونه‌ای دیگر بود. در این کشور به‌علت نبودن سرچشمه‌های آبی، تنها از انرژی گرما استفاده می‌شد که در جنب خود محلهای مصرف تولید می‌شدند و بخصوص معادن از جریان مستقیم بهره می‌گرفتند. در امریکا، در ۱۹۰۱ در شهرهای بزرگ و پرجمعیت، شبکه‌های جریان مستقیم تفوق داشتند. جریان متناوب برای انتقال انرژی و توزیع آن در حومهٔ شهرهای بزرگ و کوچک تولید می‌شد. در نیویورک در سال ۱۹۰۲ حدود ۳۰۰۰ آسانسور و بالابر موتوری با جریان مستقیم دربرابر تنها ۳۰۰ وسیلهٔ موتوری با جریان متناوب فعال بودند.

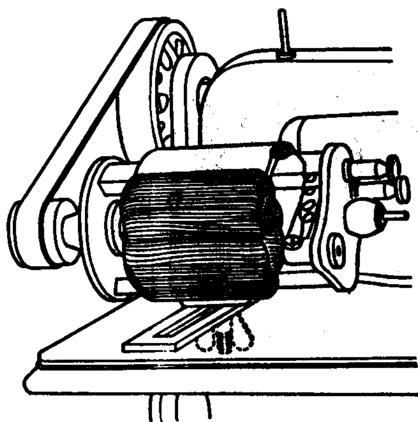
سرانجام باید تا ربع دوم سدهٔ بیستم به انتظار نشست تا موتورهای با جریان متناوب هماهنگ با جهشی در توسعهٔ شبکه‌های توزیع، کاربردی عمومی یابند.

نخستین الکتروموتورها: دیده شد که آزمایشهای الکتروموتورها از مدتها پیش آغاز شد، اما در اواخر سالهای ۱۸۷۰ بود که تکمیل دینام گرام و زیمنس راه ساخت موتورهای واقعاً قابل استفاده را عملاً باز کرد. در سال ۱۸۷۳ گرام نوعی موتور دینامی چهار قطبی و چهار جاروبکی ساخت که الگوی آن دینام به‌اصطلاح هشت‌گوش خودش بود، اما به عللی که قابل درک است این موتور، کاربردی نیافت.

نخستین موتور با توان کم برای چرخهای خیاطی ساخته شد. در سال ۱۸۲۹ آقای مارسل دپره

۱. N.Tesla (۱۸۵۶-۱۹۴۳): فیزیکدان یوگوسلاو.

۲. Dolivo-Dobrowolsky، میخاییل اوسیپوویچ (۱۸۶۲-۱۹۱۹): دانشمند روسی الکتروتکنیک؛ تولد ۱۸۶۲ و مرگ ۱۹۱۹



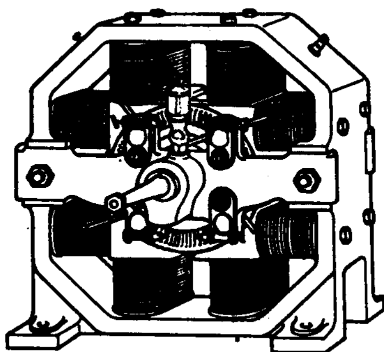
شکل ۳۴.موتور گریس‌کام (در یک چرخ خیاطی).
القاگیر کاملاً در القاگر، که تنها در شکل دیده می‌شود،گنجانیده شده است القاگیر دو T شکل زیمنس است.
قطبهای القاگیر کمی خارج از مرکز و به طرف وسط قوز کرده‌اند.

موتورهای کوچکی ساخت که ۳۰۰۰ و ۵۴۰۰ دور در دقیقه می‌گردیدند. القاگر این ماشینها یک آهنربا دائمی بود که هشت تیغه داشت. بوبین القاگیر را یک باتری دارای هشت پیل بونزنی تغذیه می‌کرد. دیده می‌شود که در آن زمان این وسیله بیشترین تحول را داشته است: کاربرد آهنرباهای دائم، نبودن شبکهٔ توزیع، تولید برق با روش کاملاً کلاسیک با پیلهای شیمیایی. این تجهیزات در آن زمان صرفاً تجربی بودند.

دستگاههای دیگری از این قبیل ساخته شد، از قبیل موتور دیل[1] در ۱۸۸۰؛ ماشین امریکایی گریس‌کام[2]؛ انگلیسی ایرتون و پرّی در همان زمان. تنها موتور دیل دارای یک حلقه گرام بود. این موتور یک کلکتور شعاعی داشت تا کمتر فضاگیر باشد، القاگیر آن با جاروبکها می‌گردید. این مکانیسم بعدها در مقیاس بزرگی جهت ساخت یک مولد نیرومند به‌اصطلاح «بدون کلکتور» و چگالی زیاد به‌کار گرفته شد. بقیهٔ موتورها با القاگیرهای ماکویی، تیرآهنی، زیمنس با چند تغییر در شکل آن ساخته شدند (شکل ۳۴).

در پایان باید از تحقیقات گوستاو ترووه[3] از ۱۸۸۰ تا ۱۸۸۳ نام برد که دنبالهٔ کارهای پیشینیان وی بوده است. در موتورهای کوچک وی هیچ چیز تازه‌ای نبود، اما بد نیست توجه دهیم که آقای

1. Diehl 2. Griscom 3. G.Trouvé



شکل ۳۵.موتور هشت‌گوش گرام.
در صفحات دو قطر جابه‌جاگر چهار مغناطیس برقی و چهار جاروبک دیده می‌شوند.

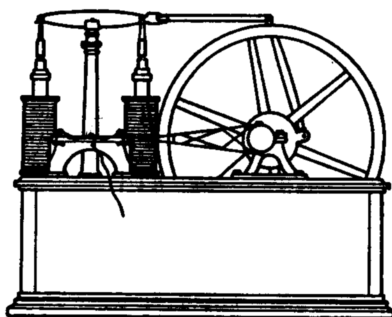
تروِوه در به‌کار گرفتن الکتروموتورهای برای حرکت دادن انواع خودروها، موتورسیکلتهای سه‌چرخی، که وزن آکومولاتور آن بسیار زیاد بود، قایق و بالاخره بالون هدایت‌شونده پیشگام بوده است. تروِوه در سال ۱۸۸۱ با یکی از موتورهای خود یکی از بالونهای هدایت‌شوندهٔ گاستون تیساندیه[1] را از زیر طاق کاخ صنعت (پاله دو لندوستری) هدایت کرد. دو سال پس از آن با همان موتور یک پرواز آزمایشی انجام داد. این موتور ۱/۵ اسب توان داشت. اما مانع اصلی باز هم وزن آکومولاتور پلانته بود. آزمایشهای بعدی آقایان رنار و کربس[2] با موتوری که دارای ۸/۵ اسب توان و مجهز به حلقهٔ گرام بود به‌همین‌دلیل دنبال نشد.

موتورهای گرام: موتوری که مدت بیست سال برای توانهای بالا ساخته می‌شد، از آغاز دههٔ ۸۰، همانا موتور گرام دارای کلکتور بود. این نوع موتور را در آغاز، به مناسبت شکل بدنهٔ آن، هشت‌گوش می‌نامیدند؛ چهار قطب و دو مدار مغناطیسی داشت (شکل ۳۵). در واقع این موتور هشت هستهٔ قطبی داشت که هرکدام از آنها دارای قرقره‌های تحریک‌کنندهٔ خاص خود بودند که جفتی تنظیم شده بودند. آقای ادیسن چند سال بعد این مکانیسم را، که از قرقره‌های سنگین آسوده بود، برای مولدهای بزرگ نخستین خود که ۱۲۵ اسب توان داشتند، اقتباس کرد.

القاگیر این ماشینها به‌جای دو، چهار خط جاروبک داشت و این، نوآوری مهمی بود که راه را برای ساخت ماشینهای چندقطبی هموار کرد.

۱. G.Tissandier (۱۸۴۳-۱۸۹۹): فضانورد فرانسوی.

2. Krebs



شکل ۳۶. الکتروموتور بوربوز (Bourbouze) (۱۸۶۵)، با پیستونهای شناور در این الکتروموتور، تأثیر ساختمان ماشین بخار با سیلندرهای عمودی، حتی به‌شکل شاهنگ دیده می‌شود.

در سال ۱۸۷۹ چنین موتوری درکارخانهٔ قندسازی سرمواز[1] نزدیک ویتری‌لو فرانسوا[2] کاربردهای گوناگونی یافت: کوبیدن دانه‌ها، وسیلهٔ پخت چغندر، کشیدن خیش تراکتور برای شخم به تاسی از نمونهٔ آزمایشی چند سال پیش آنها با لوکوموبیل. این کارها با وسایل آن روزگار به نتیجهٔ قطعی نرسیدند اما نوعی پیش آگهی استفاده از الکتروموتور بود که در دو دهه بعد پیشرفت کرد.

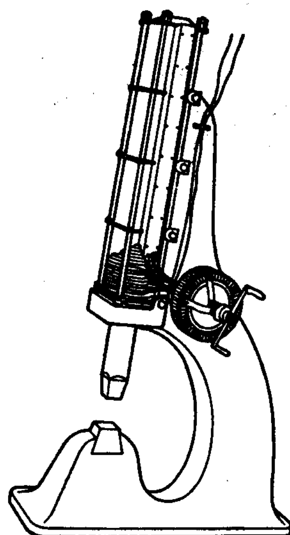
موتورهای با حرکت خطی: جالب است بدانیم که موتورهای با حرکت خطی از همان سالهای نخست، ساخته و آزمایش شده بودند، درحالی‌که موتورهای دورانی، نظیر همه آنچه که تاکنون از آنها نام رفته است، چنین نبودند.

موتورهای دارای پیستون غوطه‌ور ساخت چارلز پیج و بوربوز که رواج ناپایدار آنها را درگذشته دیده‌ایم حرکت خطی داشتند (شکل ۳۶). اما بهترین نمونهٔ ساخته شدهٔ آنها، چکش هاونی الکترومغناطیسی آقای مارسل دپره بود که در حوالی سال ۱۸۸۰ چند نمونه از آن را ساخت (شکل ۳۷). این چکش، یک مغناطیس سنگین برقی با محور عمودی داشت که قسمتهای مطبق آن را مکانیسمی کمکی پیاپی فعال می‌ساخت. بنابراین، هستهٔ غوطه‌وری که حامل چکش بود می‌توانست تا ارتفاع زیادی، حدود دومتر، بالا برده شود. کلیدی در پایان حرکت، تحریک را قطع می‌کرد و جرم چکش با سقوط آزاد پایین می‌افتاد.

آقای زیمنس در ۱۸۷۹ مته‌ای برای معادن ساخت که حرکت رفت و برگشتی کلنگ آن بدون دخالت کموتاتور (جابه‌جاگر) بود و برای این کار روی قرقرهٔ دارای جریان مستقیم قرقرهٔ دیگری

1. Sermoize

۲. Vitry-le-François: ناحیه‌ای در ایالت مارن فرانسه، کنار رودخانهٔ مارن.



شکل ۳۷.چکش هاونی الکترومغناطیسی مارسل دپره.
صد قرقره تخت با ضخامت یک سانتیمتر برروی‌هم قرار دارند و به‌شکل قرقره‌های دینام با یکدیگر متصل شده‌اند. دو جاروبک که میل لنگی آنها را حرکت می‌دهد، مجتمعاً گروه ده عددی تیغه‌های کلکتور قرقره‌ها را می‌پوشانند. لبه‌های این ده تیغه، چکش ساخته شده از آهن نرم را، در استوانه بالا می‌برند. قطع جریان برق، سقوط سریع چکش را درپی دارد.

گذاشته شده بود که جریان متناوبی با بسامد کم آن را تغذیه می‌کرد. چندی نگذشت که از سیستم الکترومکانیکی برای فرمان دادن به علامتهای راه‌آهن استفاده شد. در سال ۱۸۹۱ آقای اشتروگر[۱]. نخستین کموتاتور خودکار را برای تلفن ساخت، که در مجلد پنجم این مجموعه از آن یاد خواهیم کرد.

نباید از یاد برد که فرمان الکتریکی آونگها و ساعتها را آقای نوله در سال ۱۸۵۱ ساخت. این فرمان با توان بسیار کمی فعال می‌شد و تحت تأثیر ساعت مرکزی زمان را نشان می‌داد. ساعت مرکزی با مکانیسمهای اختراعی در سالهای ۱۸۶۰ به توسط آقایان برگه، گارنیه[۲]، میلده[۳]، استانیسلاس فوریه و غیره، حرکات را به ساعتهای پیرو انتقال می‌داد.

1. Strowger 2. Garnier 3. Milde

انتقال برق

پس از نخستین مرحلهٔ پیدایش برق صنعتی که سالهای ۶۰ و ۷۰ را دربر می‌گیرد می‌توان دید که مرحلهٔ دوم از آغاز سالهای ۸۰ تا حدود ۱۹۰۰ ادامه داشته است. از مشخصات این مرحله، آزمایشهای اولیهٔ مربوط به انتقال نیرو و به‌کارگرفتن جریانهای چند فازی است.

تا آن زمان برای هر کار، مدارهای برقی میان مولدها و محلهای مصرف، بسیار کوتاه بودند و هنوز از تکنیکهای توزیع برق خبری نبود. مولدها نزدیک لگنهای گالوانوپلاستی و در خانه‌های مورد روشنایی کار می‌کردند و در آغاز برای هر چراغ یک مولد وجود داشت. بنابراین موتورهای برقی چندان مورد علاقه نبودند. با وجود بدیع بودن آن و آرزوها و امیدهایی که بیدار کرد، این تکنیک جدید الکتریک، گویا در همان مرحلهٔ تأسیسات فضاگیر و پرخرج و بیهوده، متوقف شد.

آزمایش نخست ایپولیت فونتن در ۱۸۷۳ برای راه‌انداختن مولد گرام بوسیلهٔ یک موتور لنوار و انتقال برق آن به ماشین گرام دیگری بود که در نزدیکی آن قرار داشت. ماشین گرام اخیر در نقش موتور، برای به‌کار انداختن یک تلمبهٔ کوچک مرکزگریز آب بود. خط رابط از دو سیم ۵۰۰ متری تشکیل می‌شد و توانی که انتقال یافته بود به نیم اسب هم نمی‌رسید.

گرچه این آزمایش، تکنسین‌ها و نیز تودهٔ مردم را شگفت‌زده کرد اما هیچ‌گونه پیگیری فوری و مهمی نداشت. اندیشهٔ استفاده از انرژی هیدرولیک در شکل برقی و انتقال آن به محلهای دور مورد نظر، راه خود را به آهستگی تمام می‌پیمود. در سال ۱۸۷۵ آقای نیوده فیزیکدان چنین می‌نویسد: «فهم اینکه چرا مهندسان از این اندیشه، زیاد هیجان‌زده نشده‌اند دشوار است. منابع طبیعی مانند آبشارها و نیروی جزرومد را می‌توان به‌کار گرفت. سد پور ـ آ ـ لانگله[1] روی رودخانه سن (در ایوری)[2] هر روز ۳۰۰۰ اسب توان دارد و صنعت پاریس را می‌تواند تغذیه کند.»

اما در آن زمان از تکنیکهای انتقال فشارهای قوی به فواصل نسبتاً طولانی هیچ نمی‌دانستند. آنان که اطلاع و تجربه‌ای از مصالح نداشتند جز اینکه با روشهای آزمایشی برق را به فواصل کوتاهی انتقال دهند کاری نمی‌توانستند کرد. آقای مهندس کادیا از شرکت وال دوسن[3] دو ماشین گرام را با فاصله ۱۵۰ متر به یکدیگر اتصال داد و با دو سیم به قطر سه میلیمتر ۵۰ کیلوگرم متر را منتقل کرد. در جریان یک شخم‌زنی آزمایشی با برق که در سرمواز انجام گرفت آقای مهندس فلیکس در سال ۱۸۹۷ برق را ۵۰۰ متر انتقال داد. در همان سال آقایان ویلیام تامسن و کارل ویلیام زیمنس

1. Port-á-l'Anglāis

۲. Ivry-Sur-Seine: محلی در ایالت کرتئی، در فرانسه.

3. Val d' Osne

در مقابل پارلمنت انگلستان نشان دادند که چگونه خواهند توانست از انرژی آبشارهای نیاگارا برای استخراج معادن زغال‌سنگ بهره گیرند. اینان توانستند توانی برابر ۲۷ اسب را به‌کمک سیمی از مس با قطر ۱۲/۷ میلیمتر به مسافت ۵۰۰ کیلومتر انتقال دهند بشرطی که فشاری برابر ۸۰۰۰۰ ولت روی خط باشد.

این ولتاژ در سال ۱۸۹۷ از نظر تئوری عملی نبود اما بخوبی نشان می‌دهد که این اندیشه‌ها که پس از مدت کوتاهی بر دستاوردهای نظری تکیه می‌کردند و نیز پراتیکهای بسیار مشخص، در چه مسیری به پیش می‌رفتند. در ضمن توجه می‌دهیم که آبشار نیاگارا نخستین تجهیزات مولدهای توربینی خود را دقیقاً ۲۰ سال بعد دریافت داشت.

نخستین کارهای دپره: آقای مارسل دپره فیزیکدان فرانسوی بود که در سالهای ۱۸۸۱ ـ ۱۸۸۵ از سد انتقال برق به فواصل دور گذشت. در اوایل ۱۸۸۱ نظریهٔ مربوط به انتقال «انرژی بوسیلهٔ برق» را طبق بیان خود تقریباً در کل آن فرمولبندی کرد. وی بر پایهٔ قوانین بنیادی که در پنجاه سال پیش کشف شده بودند جنبه‌های گوناگون مسأله را بررسی کرد و نشان داد که آنها، علی‌رغم منبع انرژی، جملگی به راه‌حلهای مشابهی می‌رسند. یکی از نخستین این نتایج این بود که مرز مشهور بازده هر موتور در ۵۰٪ مرزی پایینتر است و این بازده را می‌توان بالا برد. وی همچنین شرایط نظری مربوط به تأمین توزیع جریان برق در نقاط مختلف مصرف، موتور یا لامپ روشنایی را تعیین کرد.

این مسأله در آن روزگار، بسختی مورد گفت‌وگو بود. گفته می‌شد هرچند که نخستین راه حل از بوتهٔ آزمایش گذشته است، کاربرد یک ژنراتور برای هر واحد مصرف، نه رضایتبخش و نه اقتصادی بود. علاوه‌براین، در کار مولد نقایص بزرگی هم وجود داشت. تغذیهٔ زنجیری یا به‌اصطلاح آن زمان، ولتاژی، برای روشن‌سازی رایجترین سیستم مورد استفاده بود، اما باید تعبیه‌هایی به‌کار می‌رفت تا زمانی که لامپی را از مدار خارج می‌کنند همهٔ مدار قطع نشود. تغذیهٔ موازی برای تنظیم خروجی مولد برحسب نوع مصرف، دشواری بزرگی پدید می‌آورد. می‌توان گفت که مشخصهٔ این دوره تا سال ۱۸۸۱ تشبث سازندگان عمده به انواع مهارتها تعبیه‌ها برای فرار از این دشواریها بود.

تنها کسی که توانست ریشهٔ همهٔ این دشواریها را بیابد و راه‌حلهای نظری تعمیم‌پذیری برای آنها پیشنهاد کند آقای دپره بود. او در کارهای خود با همهٔ روشهای تجربی تخمینی رایج آن زمان، قطع رابطه کرد، او خود پاره‌ای از این تخمینهای غیر علمی را ذکر می‌کند تا دقت محاسبات خود را نشان بدهد. یکی از دشواریهایی که همواره با هر بحث جدی مقابله می‌کرد، اثر زیانبخش فاصله بود. پس از آزمایشهای سرمواز، که درگذشته از آن یاد شد و آزمایشهای دیگری که در نوازییل (در

سن ـ ا ـ مارن) در شکلات‌سازی ژول منیيه[1] انجام گرفت این اندیشه پیش آمد که به قطر سیمها باید به تناسب فاصله افزوده شود. معلوم است که چه نوع استدلالی توانسته است به چنین نتایجی برسد.

بعضی ارقام شگفت‌انگیز، گاهی کاملاً من‌عندی، ذکر می‌شدند که سبب دلسردی همهٔ تأسیسات مهم می‌شدند. مثلاً در امریکا محاسبه شده بود که «برای انتقال نیروی کار آبشار نیاگارا به محلهای دور، مقدار مس مورد نیاز از ذخایر مس معادن دریاچه سوپریور بیشتر است». آقای دپره می‌افزاید: «بدین‌ترتیب من ظاهراً این افتخار را داشتم که حقیقتی را، که این‌همه بد فهمیده شده بود، ثابت کنم (که بازده خط ربطی به طول آن ندارد).» این حقیقت «با ناباوری بسیاری حتی از سوی الکتریسینها» برخورد شد.

وانگهی زمانی‌که این حقیقت پذیرفته شد محافل صلاحیتدار در خوش‌بینی افراط کردند. کارشناسان انگلیسی و امریکایی با محاسبه بدین نتیجه رسیدند که برای توزیع انرژی کامل همین آبشارهای نیاگارا در سراسر جهان، تنها کابل با قطر ۱۳ میلیمتر کفایت دارد. اما دپره بی‌درنگ حساب کرد که این انرژی که شاید بیش از دو میلیون اسب بخار باشد، با در نظر داشتن انواع مقاومتهای احتمالی خطوط و دستگاهها، باید فشاری برابر یک‌ونیم میلیون ولت را تحمل کند تا در فاصلهٔ ۷۵ کیلومتری تنها ۵۰٪ بازده داشته باشد. در این دوران چنین ولتاژی سبب وحشت حتی خود دپره شد. حال که چنین است، چرا باید از سیم با قطر ۱۳ میلیمتری استفاده کرد و نه از سیم تلگرافی ۴ میلیمتری؟ وی نوشته است: «بالا بردن کم ولتاژ منبع، هزینهٔ چندانی ندارد و زمانی‌که با میلیونها ولت سروکار داریم تردیدی برای این هزینهٔ کم خطاست.»

اگر اصراری باشد که بدانیم چرا آقای دپره تصمیم به حل مسألهٔ انتقال برق گرفت باید بگوییم که دخالت وی در این قضیه بمنظور برداشتن سدی بود که با آنچه که آقای گرام ده سال پیش فرصت حل آن را یافت شباهت بسیار داشت. وانگهی، در تاریخ صنعت وجود چنین موانعی فراوان دیده شده است. می‌توان آن را با کارهای وات برای ماشین بخار، استیونسن برای لوکوموتیو، و اوتو برای موتورگازی و سرانجام آقای بل برای تلفن مشابه دانست. استمرار تحول صنعت، حتی در روزگار ما هم، تنها یک نمود است.

آقای دپره که فروتنی بیشتری از بعضی معاصران خود داشت، و جسورتر از برخی دیگر بود با محاسبه ثابت کرد که با دو ماشین گرام از نوع C «انتقال یک کار مفید ۱۰ اسب به فاصله ۵۰ کیلومتری بوسیلهٔ یک سیم معمولی تلگراف ممکن است، بشرط اینکه نیروی اولیهٔ آن حدود ۱۶

1. Jules Menier

اسب باشد.» بعدها وی پس از انجام آزمایشهای نخستین خود، نشان داد که با فشاری «معقول» انرژی برقی را می‌توان با بازده ۵۰٪ به فاصله ۳۵۰ کیلومتری انتقال داد؛ انرژی گرفته شده بوسیله خط بعدی را نیز می‌توان با همان بازده به همان فاصله منتقل ساخت. بنابراین، در فاصلهٔ ۷۰۰ کیلومتری، ۲۵٪ انرژی نخستین را خواهیم داشت: در اینجا تصریح می‌کنیم که این درصد، بازده همهٔ تأسیسات انتقال برق است نه بازده یک موتور تنها. شهر پاریس هم می‌تواند از انرژی آبشارهای کوههای آلپ یا نیروی جریان رودخانهٔ بزرگ راین تغذیه شود و هم از انرژی جریانهای کشندی اقیانوس.

آغاز تجربه‌ها: آغاز کارهای دپره در سال ۱۸۸۱ بدین علت بود که در این سال در پاریس یکی از نمایشگاههای متعدد برق این زمان جریان داشت. نوآوریها سریع بودند و هر یک از آنها توجه زیادی را به خود معطوف می‌داشت. این توجه هم از سوی تودهٔ مردم و هم بوسیله کارشناسان آشکار بود، وسایل نخستین که برای روشن‌سازی خانه با برق ساخته شدند با مشکلات تبعی انتقال و توزیع جریان برق روبه‌رو بودند. آقای دپره سیستمی برای توزیع پیشنهاد کرد که در برابر سیستمهای مورد نظر اشخاص متعدد دیگر، از جمله آقایان ادیسن و براش قرار داشت. در سیستم دپره، مولد به‌کمک سیستم ویژه‌ای از تحریک الکترومغناطیسی، خود را تنظیم می‌کرد. وی بدین‌ترتیب درستی نظرات خود را با عمل ثابت کرد و مدار گسترده‌ای را تغذیه کرد که در آن کارگاههای بسیاری با دستگاههای گوناگون با اتصال موازی فعال می‌شدند.

اما این نخستین نمایش برای متقاعد کردن اشخاص بدبین کافی نبود. این نمایش در آغاز سال بعد با تجربه‌ای که در کنسرواتوار پیشه و هنر روی یک خط ۸۰۰ اهمی هم‌ارز فاصله‌ای برابر ۸۰ کیلومتر صورت گرفت، کامل شد برپاکنندگان نمایشگاه برق در همان سال، ۱۸۸۲ در مونیخ به وی فرصت دادند تا آزمایش جالبتری را انجام دهد. یک صنعتگر باواریایی کارخانهٔ خود را در میسباخ[1] در اختیار وی گذاشت تا یک دینام گرام که توربینی هیدرولیکی آن را می‌گرداند در آنجا قرار دهد. در این آزمایش جریان برق می‌بایست حدود ۵۰ کیلومتر منتقل شود. این خط از یک سیم تلگراف تشکیل می‌شد و پایان آن، کاخ نمایشگاه بود. این خط یک موتور برقی را تغذیه می‌کرد که آن نیز بنوبهٔ خود یک تلمبهٔ هیدرولیک با توان تنها ربع اسب را به‌کار می‌انداخت. بازده این انتقال از ۳۹٪ کمی پایینتر بود. حوادث متعددی نزدیک بود این آزمایش را مختل کنند. اما آزمایش نشان می‌داد که این انرژی می‌تواند به‌شکل جریان برقی به فاصله‌ای که در آن روزگار چشمگیر می‌نمود انتقال یابد.

1. Miesbach

نمایشهای تعیین‌کننده: آقای دپره در سالهای بعد نتایج به‌دست آمده در مونیخ را با آزمایش تازه‌ای که در ماه فوریه در ایستگاه راه‌آهن شمالی انجام داد تأیید کرد. در این آزمایش مولد و موتور پهلوی یکدیگر گذاشته شده بودند اما دو تا از بستهای اتصالی آنها را حلقه‌ای که از لو بورژه[1] می‌گذشت به یکدیگر اتصال می‌داد کاری که مستلزم اتصال دو سیم به طول ۸٫۵ کیلومتر است. دو بست اتصالی دیگر مستقیماً به‌هم متصل شده بودند.

آقای دپره به مشخصات مکانیکی این مولد توجه خاصی مبذول می‌داشت. به یاد آوریم که وی نخستین کسی بود که برای این دستگاهها نظریه‌ای ریاضی ارائه داشت. بدین‌ترتیب، وی عناصری را که برای محاسبهٔ تولید نیروهای برقرانی زیاد لازم بود در اختیار داشت. وی ماشین خود را به حلقهٔ گرام و دو کلکتور مجهز ساخت، و بنابراین، با اتصال زنجیری می‌توانست به ۲۷۰۰ ولت (۶۰ اسب توان) دست یابد. این موتور پنج اسب توان داشت. این نیرو در انتقال به‌هنگام آزمایش از ۰٫۲۵ به ۴٫۵ اسب و بازده انتقال از ۳۰ به ۴۸٪ تغییر کرد.

در پایان، دپره با انجام یک ردیف آزمایشهایی که در سال ۱۸۸۳ بین ویزی[2] و گرنوبل و در سال ۱۸۸۵ بین پاریس و کری[3] به‌عمل آورد به همهٔ تردیدها دربارهٔ امکانات انتقال جریان برق پایان داد. آزمایش نخست تکرار آزمایش پیش اما در فاصلهٔ بیشتر، ۱۴ کیلومتر، بود و در نمایشگاه سال ۱۸۸۱ ارائه شد. این جریان که از یک کارخانهٔ هیدرولیکی ویزی انتقال یافته بود، در گرنوبل نخست یک تلمبهٔ کوچک، مانند مورد مونیخ، را به‌کار انداخت، سپس دو مولد را، که در همان‌جا الکتروموتورهایی را تغذیه می‌کردند که چند ماشین‌ابزار، دستگاه خراطی، ارهٔ مجمعه (دیسکی)، پرس چاپ و بالاخره یک مدار روشن‌سازی با ۱۰۸ لامپ روشنایی ادیسن را به‌کار انداختند.

در آزمایشهای بین پاریس ـ لاشاپل و کری، راه‌آهن شمالی فرانسه بخشی از هزینهٔ آن را، وروچیلد بانکدار بخش دیگر آن را متقبل شده بود. این آزمایشها طبق برنامهٔ دقیقی انجام یافتند که مثلاً انتقال جریان با ولتاژ ۶۰۰۰ در آنها پیش‌بینی شده بود. در این آزمایشها، مانند آزمایش گرنوبل به‌جای یک سیم معمولی تلگراف از سیمی استفاده شد که از مفرغ سیلیسیم‌دار بود. برای پرهیز از حوادثی نظیر آنچه که در تجربهٔ نخستین مربوط به ایستگاه راه‌آهن شمالی اتفاق افتادند ـ جرقه‌زنی بستهای اتصال با جرم (اتصال به زمین) در اثر بروز ولتاژ اضافی، که منجر به مرگ پل کورنو فیزیکدان شد ـ می‌بایست مسأله عایق‌سازی این بستها حل می‌شد. این آزمایشها روی‌هم‌رفته بیش

---

۱. Le Bourget: محلی در شهرستان سن‌ـسن‌دنی واقع در شمال پاریس.

۲. Vizille: محلی در شهرستان ایزر، از ایالت گرنوبل.

۳. Creil: محلی در شهرستان اواز، کنار رودخانهٔ اواز.

از یک سال ۱۸۸۵ ـ ۱۸۸۶ به درازا کشید تا دقت کار خط، مطمئن و تعهدات آقای دپره عمل شده باشد. اما پس از گذشت چهار سال کار نظری و آزمایشهای واقعی، هنوز دشواریهای گوناگونی وجود داشت که باید مرتفع می‌شدند، گرچه لااقل از نظر تودهٔ مردم و کارشناسان، وی موفق شده بود.

شرکت گرام بنوبه خود درخواست کرد که توانایی وی در این زمینه به ثبوت برسد، زیرا همهٔ کارهای دپره با مولدهای طرح آن شرکت انجام گرفته بود. عملاً چهار دینام گرام که با اتصال زنجیری به یکدیگر مربوط می‌شدند و روی‌هم‌رفته ۵۹۰۰ ولت تولید می‌کردند در پایان خط، در فاصلهٔ ۵۷ کیلومتری، سه ماشین مشابه را که آنها هم با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند به‌عنوان موتور فعال می‌ساختند. بازده این انتقال ۵۰٪ بود، یعنی در همان حدودی که دپره به‌دست آورده بود.

با این‌حال، چنین می‌نماید که در بخش جریان مستقیم به مرزهای این تکنیک دست یافته بودند. یک کلکتور دینام نمی‌توانست ولتاژی بالاتر از ۳۰۰۰ ولت را تحمل کند. وانگهی مسألهٔ عایق‌سازی بستهای اتصالی دینامهای پایانی یک تسلسل زنجیری، در بالاتر از ۶۰۰۰ ولت لاینحل می‌نمود.

سیستم انتقال رنه توری: به دورانی رسیده بودند که ترانسفورماتورهای لوسین گولار[1] و گیبس بتازگی درکارآمده بودند و بنابراین، راه برای به‌کارگیری جریانهای متناوب باز شده بود و برای تولید ولتاژهای بالا با وسایل نسبتاً ساده امکاناتی به‌دست آمده بود.

با این‌همه، با اینکه کارهای اولیه در این زمینه را آقایان دالیوو ـ دابروولسکی و براون (مهندسی از ژنو) انجام داده بودند، آقای توری توانست عصر انتقال جریان مستقیم را ادامه دهد.

در ماه مهٔ ۱۸۹۰ شرکت صنایع برق ژنو در شهر ژنوا مداری از توزیع برق مستقیم به طول ۴۸ کیلومتر با ۱۲۰۰۰ ولت فشار برای ۱۰۰kW قدرت، مطابق سیستم توری برقرار کرد. همین شرکت تأسیسات دیگری از همین نوع در جاهای دیگر برپا ساخت و این تنها شرکتی بود که در زمانی‌که این تکنیک به‌سوی کاربرد جریانهای متناوب پیش می‌رفت، بدین کار دست زد. در همان سال مدار لاشو ـ دو ـ فون[2] در سویس به طول ۵۶ کیلومتر و با فشار ۲۲۰۰۰ ولت برقرار شد.

در سال ۱۹۰۶ شاهد برقراری خطی به طول ۱۸۰ کیلومتر برای برق‌رسانی به شهر لیون می‌باشیم، خطی که بیش از سی سال فعال بود. مشخصات این خط دو بار تغییر کرد.

1. L. Gaulard 2. La Chaux-de-Fonds 3. Plombieŕe

جریان این برق در کارخانهٔ پلومبیر[3] واقع در موتیه[1] با کمک آبشاری از ایزر حدود ۶۵ متر که ۶۳۰۰ اسب ایجاد می‌کرد، تولید می‌شد؛ این خط زیر فشار ۵۷۶۰۰ ولت بود. مولدهای این خط با یکدیگر اتصال زنجیری داشتند و ولتاژ آنها را با تغییر فرجه جاروبکها، تنظیم سرعت توربین یا تغییر تعداد مولدها، کم و زیاد می‌کردند. آقای توری در واقع با استفاده از اندیشه‌های گرام و کابانلا[2] وسیلهٔ ثابت نگاهداشتن شدت جریان در ۷۵ آمپر و تغییر ولتاژ را ساخته بود. برروی‌هم چهار توربین، شانزده دینام را فعال می‌ساختند.

جزئیات مهم و متعدد این تأسیسات با دقت تهیه شدند: عایق‌سازی زمین گروه ژنراتورها، کلیدهای ویژه‌ای که بوسیلهٔ آنها می‌توانستند در صورت تغییر جهت گردش توربین، جریان برق هر گروه و نیز هر دینام را قطع کنند (کوپلونگ تاشونده یک دینام برای کار موتوری آن می‌تواند خطرناک باشد)؛ امکان ایجاد اتصال به زمین میانه مدار قدرت و غیره.

خط هوایی به یک خط زیرزمینی به طول دو کیلومتر وصل می‌شد تا به مرکز شهر راه یابد. ولتاژ خط در ورود به شهر بوسیلهٔ کموتاتورهایی به ۶۰۰ ولت کاهش می‌یافت که ولتاژ متناسب توزیع در شبکه تراموهای لیون بود. یک پست فرعی در میانهٔ خط ساخته شده بود که دارای سه کموتاتریس (تبدیلگر گردان) برای تبدیل جریان مستقیم به متناوب و تهیهٔ جریان سه فازی برای شرکت نیرو و روشنایی گرنوبل بود. در موارد لزوم کار این کموتاتریس‌ها معکوس می‌شد و جریان سه فاز خط ثانوی به جریان مستقیم برای مصرف شهر لیون تبدیل می‌شد.

برتریهای این مجموعه در سادگی تأسیسات آن و فرمانهای مربوطه بود. نتایج آن چنان رضایتبخش بود که کاربرد آن نه‌تنها ادامه یافت بلکه حتی در دوره‌ای که مشکلات اولیهٔ مربوط به انتقال جریان متناوب، بسرعت و گستردگی برطرف می‌شدند، رواج گرفت.

بین سالهای ۱۹۱۱ تا ۱۹۱۷ شدت جریان را دو برابر کردند و به ۱۵۰ آمپر، و فشار را به ۱۰۰۰۰۰ ولت رسانیدند. گروههای مولدهای جدیدی که در هر کلکتور ۴۰۰۰ ولت می‌دادند ساخته شدند. کارخانه‌های متعددی در طول مسیر این خط برپا شدند و برای اتصال خط با این کارخانه‌ها ابزارهای بدیعی اندیشیده شد. اصلاحات دیگر، بویژه کاربرد دینامهای ۷۵۰۰ ولتی، در سالها ۱۹۲۵ تا ۱۹۲۹ انجام گرفت. در سال ۱۹۳۶ فشارکاری به ۱۲۵۰۰۰ ولت و مقدار مصرف برای شدت ثابت ۱۵۰ آمپر به ۱۸۰۰۰kW رسید. تنها غم همسانی با دیگر شهرها بود که سبب شد لیون جریان مستقیم موتیه را، که جریان مستقیم مورد استفاده در فرانسه بود، رها سازد.

---

۱. Moutiers: محلی در ساووا، که در کوههای آلپ شمالی فرانسه، هم‌مرز با ایتالیا و سویس است.

2. Cabanellas

آقای رنه توری با درگیر شدن در این کار در سال ۱۸۹۰ به آزمایشی سرنوشت‌ساز دست زد. این واقعیت که فشار کاری خطوط در جریان متناوب در آن زمان تنها در حدود ۲۵۰۰۰ ولت بود و تنها در سال ۱۹۱۴ بود که توانست به آستانهٔ ۶۰۰۰۰ برسد می‌تواند این کار را توجیه کند. اما آقای توری با توسعهٔ ظرفیت تأسیسات خود طی چندین دهه، روشن‌بینی و تهور خود را نیز نشان داده است. دنبالهٔ حوادث، پس از یک دوره کاربرد انحصاری جریان متناوب نشان داد که انتقال فشارهای بالاتر از ۵۰۰۰۰۰ ولت در جریان مستقیم با صرفه‌تر از جریان متناوب است. در اوایل سالهای ۱۹۷۰ این تکنیک به‌سوی پیوستگی جریانهای مستقیم با یکدیگر با فشارهای ۸۰۰۰۰۰ تا یک میلیون ولت گرایش یافت. بدین‌ترتیب، می‌توان گفت که آقای توری در این زمینه خود را به صورت پیشگام نشان داده است و ساخته‌های وی درحال‌حاضر اهمیت تاریخی قابل توجهی دارند.

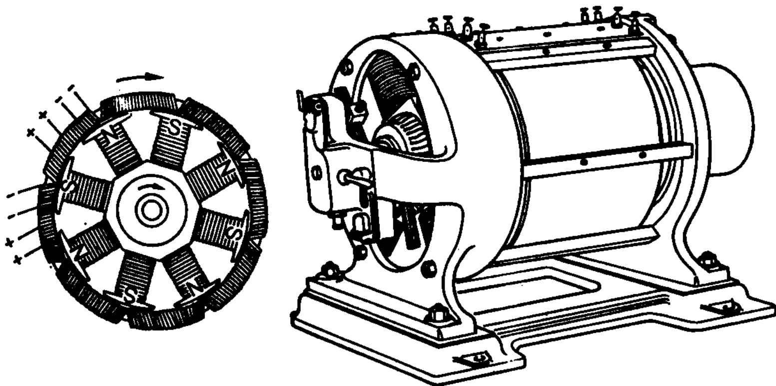
۳

جریان متناوب

از جنبهٔ نظری، ساختن ماشینهای جریان متناوب[۱] آسانتر از ساختن دینام با جریان مستقیم است، زیرا برای تولید جریان متناوب تنها باید دو حلقهٔ مسی را روی محور روتور کارگذاشت و جاروبکی با هر حلقه اصطکاک داشته باشد؛ درحالی‌که ساخت کلکتور کار بسیار دشواری است.

آلترناتورهای نخستین: آقای گرام در همان اوایل کار آلترناتورهایی ساخت که با دینامهای وی تنها تفاوت بالا را داشتند. اما از همان زمان، گرچه جریان متناوب هنوز هیچ جنبهٔ صنعتی نداشت و تنها می‌توانست در تغذیهٔ لامپهای قوسی، که درگذشته از آنها سخن گفتیم، به‌کار رود، تفکر تکنسین‌ها از کندوکاو نایستاد. بزودی دریافت شد که روی این جریان متناوب و وضع متقابل القاگیر و القاگر می‌توان حساب کرد و این کار راه را برای هر ترکیب هندسی ممکن باز می‌گذارد ـ ترکیباتی که تنوع دستگاه قرقره‌ها و چگونگی پیوست آنها با یکدیگر نیز بدانها اضافه می‌شود. بازیهای ممکن ترکیبات راه‌حلها، دقیقاً انگیزهٔ پیدایش انواع آلترناتورهایی بوده‌اند که در سالهای ۱۸۸۰ و بعد طراحی و ساخته شدند و پس از مدت کوتاهی از جریان متناوب ساده به جریان چند فاز رسیدند.

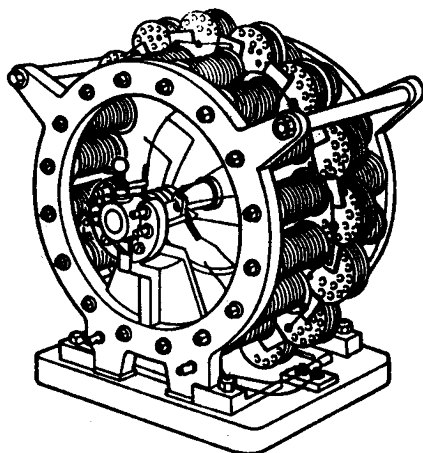
این کار با ساختن آلترناتورهای دارای القاگر گردان در داخل القاگیر ثابت شروع شد. مثلاً



شکل ۳۸.آلترناتور گرام، مشهور به دستگاه تقسیم (۱۸۷۷ ـ ۱۸۷۹).
سمت چپ: نمایهٔ القاگر گردان، دارای هشت قطب، داخل حلقهٔ القاگیر ثابت.
سمت راست: نمایهٔ دستگاه خود راه‌انداز. در انتهای چپ آن، تحریک‌کننده دیده می‌شود.این تحریک‌کننده شامل حلقه‌ای (در مرکز) است که بین چهار قطب القاگیر ثابت می‌گردد. تنها یک فلکه، محوری را که حامل روتورهای آلترناتور و دینام راه‌انداز است می‌گرداند.

دستگاه تقسیم گرام که در سال ۱۸۷۸ برای روشن کردن شمعهای یابلوچکوف ساخته شد، چنین بود (شکل ۳۸). القاگر یک چرخ‌دندهٔ واسطهٔ مغناطیسی بود که داخل حلقهٔ مغناطیسی ثابتی که از ورق آهن نرم ساخته شده بود می‌گردید. این حلقه هشت قرقرهٔ مشخص داشت که با زاویهٔ ۴۵ درجه از یکدیگر جدا شده بودند. قرقره‌ها هر یک چهار بخش داشتند که با اتصال زنجیری یا موازی با یکدیگر مربوط می‌شدند. هر بخش یک شمع را تغذیه می‌کرد و بدین‌ترتیب جریان توزیع شده بود.

مسألهٔ تحریک قرقره‌ها به‌شکل خاصی مطرح شد زیرا ایجاد مستقیم آن با جریان تولید شدهٔ بوسیلهٔ خود ماشین، مثل دینامها، امکان نداشت. دو راه‌حل همزمان پیشنهاد شدند: نخست گذرانیدن بخشی از جریان القاگیر از یک دستگاه فرعی کلکتور ـ کوموتاتور بود؛ کاری که یک خود راه‌اندازی واقعی بود. راه‌حل دوم استفاده از یک دینام ضمیمه بود که جریان مستقیم آن قرقره‌های القاگر را تحریک می‌کرد. برای اینکه از دو تسمهٔ انتقالی استفاده نشود، یکی برای آلترناتور و دیگری برای دینام، دینام بی‌درنگ بر روی همان پایه و محوری قرار گرفت که آلترناتور قرار داشت. این مکانیسم را به‌طور کاملاً عامیانه، از خود راه‌اندازی نامیدند. این راه‌حل، بی‌درنگ پذیرفته شد.



شکل ۳۹.آلترناتور تقسیم، زیمنس و هفنر فون آلتنک (۱۸۷۸).
حلقه‌های ثابت حامل القاگرهای برقی از دو سوی روتور گردان با القاگیرهای تخت و بدون هسته دیده می‌شوند.

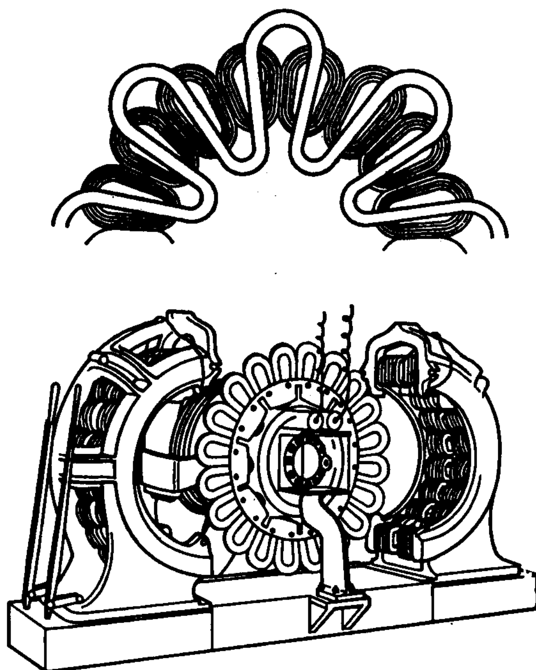
زیمنس نیز در سال ۱۸۷۸ آلترناتوری با القاگیرگردان ساخت که مستقیماً با دستگاه کلارک ـ پس از اینکه آقای هنری وایلد آن را در سال ۱۸۶۷ ساخت ـ اتصال داشت. دیده می‌شود که کارهای پیشینیان روی ابزارهای آزمایشگاهی تا چه اندازه تحت تأثیر تحقیقات برای ساختن دستگاههای صنعتی بوده است.

القاگیر این دستگاه یک حلقهٔ مفرغی بود که چارچوبهای حامل سیم‌پیچها، با بستهای فلزی روی آن نصب شده بودند (شکل ۳۹). قرقره‌های القاگیر، به تعداد ۸ و ۱۲ و ۱۶ بدون هستهٔ مغناطیسی بودند. این نخستین ماشینهای با القاگیر بدون هستهٔ مغناطیسی بود. حلقهٔ متحرک سبکتر بود، در نتیجه اتلاف ناشی از گرم شدن و جریان فوکو را کاهش می‌داد. این القاگیر بین دو حلقهٔ ثابت مغناطیسهای برقی القاگر به تعداد برابر، همین و همان مساوی با قرقره‌های القاگیر، می‌گردید. تناوب قطبها به‌گونه‌ای بود که میدانهایی با جهات مخالف ایجاد می‌شدند.

فراخنای راه‌حلها: القاگیر ثابت، القاگیر گردان، با یا بدون آهن، طوفان راه‌حلها آغاز شده بود. با آوردن چند نمونه، موضوع روشن می‌شود.

در سال ۱۸۸۲ سباستیانو تسیانی دو فرانتی[1] با استفاده از طرح ویلیام تامسن دستگاه بوبینی

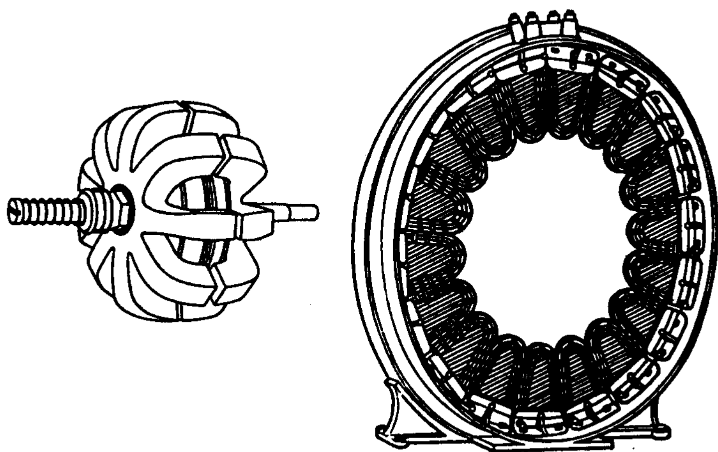
1. S. Z. de Ferranti



شکل ۴۰. آلترناتور فرانتی ـ تامسن (۱۸۸۲).
در پایین، دو بخش القاگر به‌طور جدا از هم نشان داده شده است تا موقعیت القاگر دیده شود.
در بالا، محل تسمه مسی، که القاگیر است نسبت به قرقره‌ها و القاگر نمایانده شده است.

از القاگیر گردان ساخت که شکل آن کاهش عرض چاک موجود بین دو حلقهٔ القاگر را ممکن می‌ساخت (شکل ۴۰). القاگیر دیگری بدون آهن هم در کار بود که تسمه مسی عریضی با ضخامت تنها ۲۰ میلیمتر و طول ۳۶ متر بود. این تسمه فلزی در میدان پیچیده شده بود، و بدین‌ترتیب، دوازده لایهٔ عایق شده بوسیلهٔ نوارهای لاستیکی پهلوی هم گذاشته می‌شد. سبک بودن القاگیر، دور زیاد حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ در دقیقه را ممکن می‌ساخت.

القاگیر دستگاه تامسن ـ فرانتی دو سال بعد با تعویض دستگاه پر پیچ و خم با قرقره‌های جدا از هم مستقر روی حلقه بهتر شد. بدین‌ترتیب، با شگفتی دیده شد که شکلهایی که سی سال قبل پیدا شده بودند و دارای آهنرباهای دائمی مگنتهای بزرگ اولیه بودند از نو پدیدار شدند. این دستگاه



شکل ۴۱.در سمت راست، القاگیر و در سمت چپ، القاگر آلترناتور موردی ـ ویکتوریا.

با کاهش دور به ۶۰ تا ۱۰۰ دور در دقیقه، ولتاژ بسیار زیادی در حدود ۱۰۰۰۰ ولت تولید می‌کرد و تا ۲۰۰۰۰۰ لامپ را روشن می‌ساخت.

در سالهای ۹۰، ماشین‌سازان دیگری نظیر پاتن بر پایهٔ اصول فرانتی، آلترناتورهای افقی ساختند.

یکی دیگر از مدلهای اصیل این دوره، آلترناتور ساخت آقای و. م. موردی[1] بود که در انگلستان شرکت براش آن را ساخت. این آلترناتور یک القاگیر ثابت داشت که از یک حلقهٔ بزرگ تشکیل شده بود که قرقره‌های مشابه قرقره‌های فرانتی را در داخل حمل می‌کرد. عایق‌سازی این قرقره‌ها با میکا و ابونیت انجام گرفته بود. القاگر آن تنها یک قرقرهٔ بوبین بزرگ هم مرکز با محور گردش آن بود که در مرکز حلقهٔ القاگیر جاسازی شده بود. قرقرهٔ بوبین اخیر را دو کفشک قطبی نیرومند احاطه کرده بودند که بازوهای خمیدهٔ آنها آن را تقریباً به‌طور کامل دربر می‌گرفتند. قرقره‌های القاگیر بین رویه‌های انتهایی این بازوهای دارای اتصال مثلثی گذاشته می‌شدند و فضای خالی بین آنها بسیار کم شده بود (شکل ۴۱).

توجه می‌دهیم که با وجود تنوع شکلهای بخشهای گوناگون ماشینها، همهٔ ماشین‌سازان و همهٔ نظریه‌پردازان این دوره و نیز پس از آن، درپی راهی برای نزدیک شدن به ساختارهای ماشینهای پیشین بودند: کفشکهای قطبی قوی لفافی؛ به حداقل رسانیدن فضای بین قطعات؛ و غیره. گرچه راه‌حلهای بهینه بتدریج به‌دست می‌آید، بدین جهت گوناگونی متعدد مونتاژ، تنها ثمرهٔ آزمایشها بود

1. Mordey

و بخصوص ناگزیر می‌بایست منتظر مصالح مناسب نظیر: ورقهای آهن، سیم مسین، مواد عایق بود که در کیفیت ویژهٔ این کاربردها تأثیر زیادی داشتند.

در پایان در این تحول پیدایش منطقی انواع جدید جریانهای برق را باید در نظر داشت که در آن زمان دیگر کم‌وبیش بخوبی شناخته شده بودند.

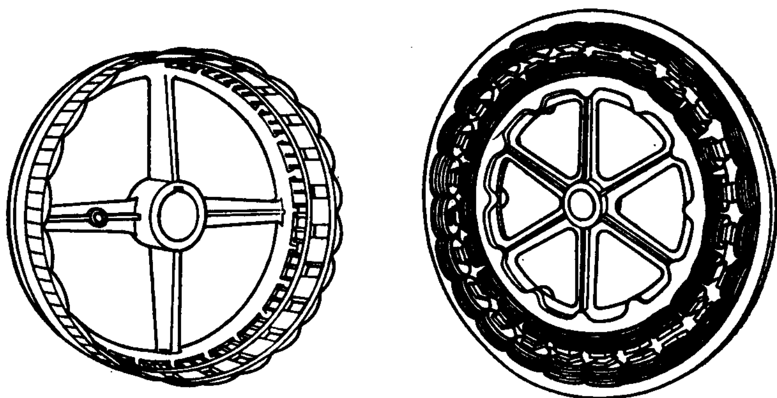
القاگر ساخت موردی، اگر دقیقاً سخن گوییم، در القاگیر تولید جریان موجواره ـ نه متناوب ـ می‌کرد. بازده این دستگاه که با نام موردی ـ ویکتوریا شهرت داشت برای ۲۵۰kW برابر ۹۵٪ بود. این دستگاه در ۳۰۰ دور در دقیقه و با داشتن ۲۰ جفت قطب، جریانی با ۱۰۰ دورهٔ تناوبی در ثانیه تولید می‌کرد.

مهندس براون (س. ا. ل.) که در آن زمان در کارخانهٔ اُرلیکون کار می‌کرد و هنوز با شرکت باوری سهیم نبود در سال ۱۸۹۰ آلترناتوری ساخت که القاگر آن گردان و اقتباس از موردی بود. القاگیر آن حلقه‌ای مغناطیسی و حامل قرقره‌هایی بود که روی بدنهٔ دستگاه محکم شده بودند: اما القاگر بازوهایی داشت که در اطراف به‌طور فلسی روی‌هم قرار می‌گرفتند و هر یک از آنها همهٔ سطح بیرونی مربوط به خود را می‌پوشانید. این مکانیسم نوعی توالی قطبهای شمال و جنوب را ایجاد می‌کرد که روی سطح استوانه‌ای، که نسبت به دستگاه بوبینی القاگیر خارجی شمرده می‌شد، اثر می‌گذاشت. این دستگاه تولید جریان متناوب می‌کرد، نه موجواره. ماشین‌سازان بسیاری این مدل را پذیرفتند، اما ساختی دشوار و نیز نواقصی: نشت مغناطیس و بی‌نظمی میدان در آن بود.

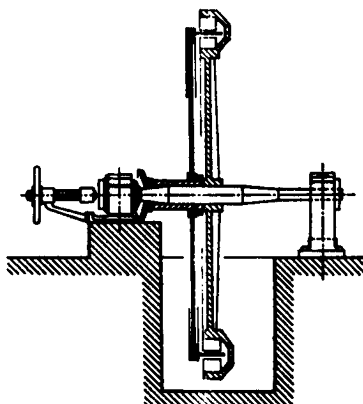
آلترناتورهای بزرگ: بیشترین تعداد آلترناتورهایی که تا اواسط سالهای ۹۰ ساخته شدند، صرفنظر از نوع آنها، ابعادی در حدود دینامهای اولیه داشتند. گردش آنها توسط فلکه و تسمه مربوط به یک ماشین محرک، ماشین بخار پیستوندار یا یک توربین آبی از نوع فرانسیس[1] یا پلتون بود. توربینهای بخار بتازگی ساخته شده بودند. و مسألهٔ انتقال حرکت به‌نحوی در شرف حل شدن بود. در مورد موتور حرارتی (با هوای گرم) پیستوندار بدینجا رسیده بودند که دستهٔ آلترناتور را مستقیماً به لنگ ماشین بخار وصل کنند. قطعه گردان آلترناتور، نقش چرخ طیار تنظیم گردش موتور را داشت (شکلهای ۴۲ و ۴۳).

بدین‌ترتیب، حدود سال ۱۸۹۵ مؤسسات گوناگونی، از جمله مؤسسه فارکو، دست به ساختن دستگاههایی زدند و آنها را تحت نام الکتروژن، که هنوز شهرت دارد به فروش رساندند. قطعهٔ گردان این دستگاهها، القاگر بود که قطر بیرونی آن به ۵ متر می‌رسید. قسمت بوبینی آن بخوبی طرحریزی، و روی حلقه‌ای چدنی نصب شده بود و این قطعه طوقه چرخ بزرگ هشت پره‌ای بود

۱. Francis، جیمز بیچینو (۱۸۱۵ـ۱۸۹۲): مهندس انگلیسی هیدرولیک که در ۱۸۳۳ به امریکا رفت.



شکل ۴۲.القاگیر (سمت چپ) و القاگر (سمت راست) آلترناتورهای بزرگ پایان سدهٔ نوزدهم.
آلترناتور پاتن: القاگیر، ثابت و حامل حلقهٔ قرقره‌های ـ تخت است. این قرقره‌ها به‌طور برجسته قرار داده شده‌اند و در فضای خالی بین حلقه‌های القاگر گردان جای گرفته‌اند. رجوع کنید به‌شکل ۴۳.



شکل ۴۳.آلترناتور پاتن.
در این شکل، موقعیتهای القاگیر (سمت چپ، خطوط پر) ثابت و القاگر (سمت راست) گردان نسبت به یکدیگر نشان داده شده است.

که ناف آن با محور چرخش مطابقت داشت. طوقهٔ ثابتی که روی سطح داخلی خود، هسته‌ای مغناطیسی از ورقهای عایق شدهٔ آهن را حمل می‌کرد این چرخ را در خود گرفته بود. در این هسته، چاکهایی زده شده بود که بوبینها را جا می‌دادند.

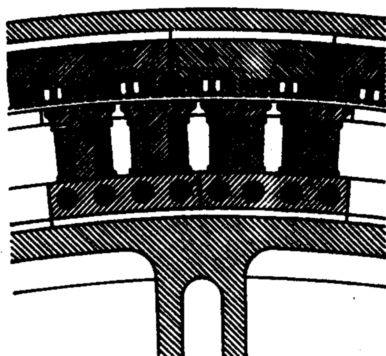
این ماشین بزرگ را اوتن ـ لوبلان ـ فارکو[1] می‌نامیدند. سازندهٔ این ماشین، آقای فارکو، در آن زمان در سن ـ کانتن بود. آقایان اوتن و لوبلان، مخترعان مکانیسمی بودند که نوسان فازهایی را مستهلک می‌ساخت که ممکن بود بین چند آلترناتور همزمانی‌که موازی یکدیگر کار می‌کنند پدید آیند. این ساختاری نسبتاً ساده بود. برجستگیهای قطبهای القاگر که در بخش مجاور فضای خالی بیرون زده بودند عمود بر صفحهٔ این چرخ، با پیچ و مهره‌های مسین محکم می‌شدند. سرهای آنها روی هر صفحه به‌طوری با یکدیگر هم‌آمده بودند که تشکیل یک رسانای پیوسته در سراسر حلقه را می‌دادند (شکل ۴۴). این مجموعه در جرم القاگر، قفسی را تشکیل می‌داد که آثار آن بر واکنش القاگر، حرکت منظم دستگاه را، در صورت اتصال زنجیری چند آلترناتور، تأمین می‌کرد. در آن زمان افزودن مستهلک‌کنندهٔ نوسان فازها در طرح تناوبگر (آلترناتور)ها تکامل بسیار پر اهمیتی بود. این نمونهٔ بسیار جالبی از وسایل فنی است که در این زمان تکامل یافت و رفته‌رفته کاملاً رضایت‌بخش و عالی شد.

فارکو تنها کسی نبود که در تکامل آلترناتورهای با القاگرهای گردان بزرگ کار کرده است. این، دستگاهی بود که بسرعت برای استفاده در سانترال‌های حرارتی با ماشینهای پیستوندار عمومیت یافت و تا آن زمان که رفته‌رفته در سالهای ۲۰ و ۳۰ ماشینهای کلاسیک جای خود را به توربینهای بخار واگذاردند، در کار بود.

ماشین فارکو نمونه‌ای عالی از آن استادکاری است که تکنسین‌ها و فیزیکدانان در این زمینه در مدت بسیارکوتاهی بدان دست یافتند. این تکنولوژی به‌طور قطعی تثبیت نشد. گر چه آلترناتورهای بزرگ فارکو یک جریان ساده موجواره تولید می‌کردند اما چند سال پس از آن نخستین واحدهایی از این نوع برای تولید جریان دو فازی دست‌کاری شدند، به‌طوری‌که خواهیم دید این زمان حدود ۱۸۹۰ بود.

آهن گردان و قرقره‌های ثابت: سرانجام گروه دیگری از آلترناتورها در سال ۸۹۰۱ ساخته شدند. اینها آلترناتورهای با جرمهای مغناطیسی گردان بودند. این نام اصول اساسی طرح آن را بخوبی بیان می‌کند. این همان اندیشه قدیمی پیچ بود. القاگر و القاگیر ثابت بودند و تغییر میدان مؤثر در ایجاد جریان القاگیر، در نتیجهٔ گردش جرمهای مغناطیسی درکنار تکیه‌گاههای قرقره‌هاست. مسألهٔ

1. Hutin-Leblānc-Farcot

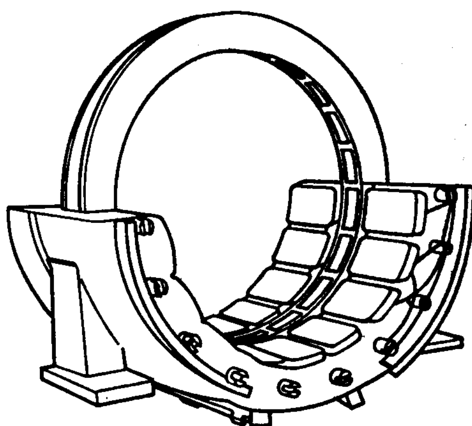


شکل ۴۴.مستهلک‌کنندهٔ اوتن ـ لوبلان.
روی حلقه القاگرگردان یک آلترناتور ـ چرخ طیار بزرگ حلقهٔ بیرونی مربوط به القاگیر ثابت است. روی حلقهٔ داخلی (القاگر گردان) در برجستگیهای قطبی مغناطیسهای برقی، شش میلهٔ مسی که نوسان فازها را مستهلک می‌کنند، دیده می‌شوند. در این شکل حدود دو دوجین حلقه دیده می‌شود. پیشرفته بودن سطح تکنیکی که ساخت چنین دستگاههایی را ممکن ساخته است، در نظر بگیرید.

اتصالها ساده شده بود و با از میان رفتن لزوم حلقه‌ها و لغزنده‌ها، بخش متحرک می‌توانست با سرعت زیادی بگردد، با این امتیازات، ساخت آلترناتورهای با بسامد زیاد (۲۰۰۰۰ دور) ممکن شد و کاربرد آنها تا سال ۱۹۲۰ ادامه یافت. آلترناتورهای آهنی، مانند مکانیسم موردی، با گردش خودشان، جریان موجواره و غیر متناوب ایجاد می‌کردند.

آقایان موردی در سال ۱۸۸۳، ایلایهو تامسن در سال ۱۸۹۰، کارخانهٔ اُرلیکون و شمار زیاد دیگری از ماشین‌سازان در سالیان بعد، به کمک این اصل مولدهایی برای جریان متناوب ساختند اما شکلها و ترتیب ساختارها، سیم‌پیچی و جرمهای گردان آنها بسیار گوناگون بود. در اینجا هم یک اصل هندسی بنیادی می‌توانست دارای تنوع بسیار راه‌حلهای اساسی باشد. آقای موردی یک قرقرهٔ تنهای القاگر در حلقه را به کار می‌گرفت که حامل جرم مغناطیسی به‌شکل ∩ بود. قرقره‌های القاگیر روی شاخه‌های ∩ سوار بودند و چرخ مغناطیسی بین آنها می‌گردید. کمی بعد، در سال ۱۸۸۸، آقای کینگدام قرقره‌های القاگر و القاگیر را متناوباً بین کفشکهای قطبی یک بدنهٔ استوانه‌ای جاسازی کرد و داخل این بدنه، آهن گردان را قرار داد.

آهن گردان در آلترناتور آقای ایلایهو تامسن ساخته سال ۱۸۹۰ یک چرخ دندانه‌دار بود.

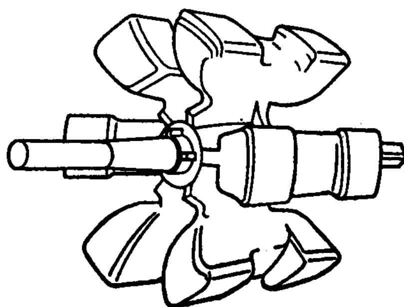


شکل ۴۵.جزئیات ساختمانی بخش ثابت یک آلترناتور اُرلیکون دیده می‌شود که القاگیر ثابت حامل دو طوقهٔ موازی با قرقره‌هاست. بخش بالایی را می‌شود جدا کرد تا تعمیر دستگاه آسان باشد. در مرکز، طوقهٔ القاگر، آن هم ثابت، و قرقره‌های آن قرار دارند. قطعهٔ گردان، آهن به شکل ۴۶ است.

قرقره‌های ثابت هم مرکز با محور گردش، آن را تحریک می‌کردند. قرقره‌ها قطبهای شمال را تشکیل می‌دادند درحالی‌که بدنه و جرمهایی که روی بدنه نصب شده بودند تا حامل قرقره‌های القاگیر باشند قطبهای جنوب بودند.

کارخانهٔ اُرلیکون، نخست با مدیریت آقای س. ا. ل. براون به ساختن آلترناتورهای با آهن گردان دست زد که شکل آنها با دانشمندی انتخاب شده بود. طوقه‌ای از فولاد نرم، بدنه را تشکیل می‌داد (شکل ۴۵). بر رویهٔ داخلی طوقه دو حلقهٔ فلزی کارگذاشته شده بود و قرقره‌های القاگیر را به‌طور ردیفی بین این دو حلقه قرار داده بودند. در تمام طول این ناودان دایره‌ای باز به‌طور ردیفی قرقره‌های القاگر کار گذاشته بودند. ترتیب قرارگیری قطعات با دقت زیاد حساب شده بود تا دستکاریهای احتمالی برای تعمیر، و به‌کاراندازی آن، بدون اوراق کردن نابه‌هنگام دستگاه یا از دقت افتادن جای قطعات، انجام گیرد. آهنهای گردان که در میانهٔ بدنه‌ای این چنین مجهز، جاسازی شده بودند میله‌ها یا چرخهای حامل کفشکهای قطبی دارای اشکال گوناگون سازگار با نوع آلترناتور مربوط به خود بودند (شکل ۴۶).

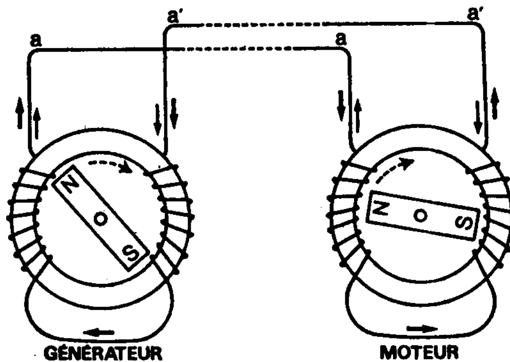
همهٔ این ترکیبات ممکن هندسی ظاهراً در مدتی کمتر از ۱۰ سال به پایان رسیدند و همهٔ ترتیبات مربوط، در عمل آزمایش و برای پاسخگویی به نیازهای گوناگون کاری، اصلاح شدند. از زمان



شکل ۴۶. القاگیر از نوع آهن گردان آلترناتور ۷۰ اسبی اُرلیکون. این القاگیر در قرقره القاگر شکل ۴۵ قرار دارد.

ساخت نخستین آلترناتورهای گرام تا زمان آلترناتورهای فارکو، تکنیکهای این دستگاه، راه‌حلهای بسیاری را تجربه کرد، و کثرت آنها در مدتی این چنین کوتاه، نشانهٔ سطح بالای مکانیکی است که ماشین‌سازان پیش از آغاز ربع پایانی سدهٔ نوزدهم بدان دست یافته بودند. برای ما هم که در روزگاری پر از شگفتیها زندگی می‌کنیم حیرت‌آور است که گرفتاریهای مربوط به ساخت دستگاه قرقره‌ها، بخش اساسی همه این ماشینها، با چه سهولتی برطرف شدند. پس از تنها چند سال تجربهٔ کورکورانه، تکنیکی این چنین انعطاف‌پذیر به‌دست آمد که ساخت چندین نوع دستگاه قرقره‌ها، با وجود اینکه تنها چند مادهٔ عایق‌کننده موجود بود، میسر شد. چنانچه قرقره‌هایی که در سالهای ۱۸۵۰ ـ ۱۸۶۰ روی ماشینها گذاشته شدند با قرقره‌های سالهای ۱۸۸۰ ـ ۱۸۹۰ مقایسه شوند می‌توان از تراز بالای دستاوردهای تکنیکی این دو یا سه دهه، آگاهی یافت. باید پذیرفت که تحول عمیق شکلها، ابعاد و ساختارهای آلترناتورها، نتیجهٔ دگرگونیهای ژرف اصول راهنمای ساخت این ماشینها نبوده است، بلکه ناشی از طبیعت و کیفیت مصالحی بود که الکترو تکنسین‌ها در اختیار داشتند، مصالحی که ترکیب و مشخصات آنها با بردباری توسط متالورژها و شیمیدانان بررسی شده بود.

موتورهای همزمان: آلترناتورهای اولیه‌ای که جریان متناوب ساده تولید می‌کردند، طبق نخستین اصطلاح رایج، یعنی تکفار، کاربرد موتورهای دینامی با همان تشکیلات را آزمایش کردند. در واقع آلترناتورهایی مورد گفت‌وگو هستند که بتوان آنها را به‌عنوان موتور به‌کار انداخت ـ دقیقاً همان‌طورکه ده سال پیش با دینامهای دارای جریان مستقیم عمل شده بود. اینها موتورهای همزمان بودند، یعنی



شکل ۴۷.نمایهٔ طرز تغذیهٔ موتور همزمان بوسیلهٔ یک آلترناتور.
این مولد و موتور، دو دستگاه یکسان هستند؛
القاگیر ثابت با دو قرقره؛ القاگر گردان، فقط یک آهنربای سادهٔ دو قطبی است.

اینکه گردش این روتور با گردش روتور مولد همزمان شده و مزیت گردشِ با سرعتی مستقل از ولتاژ تغذیه شبکه را داشتند (شکل ۴۷). درعین‌حال شامل نقص فقدان خود راه‌اندازی بودند.

آقای گالیلئو فراری ایتالیایی در سال ۱۸۹۴ می‌بایست نشان داده باشد که روتور موتور همزمان در حالت توقف، بوسیله دو نیروی برابر و متقابل تحریک می‌شده است. با ارائه یک میدان متناوب ساده بوسیلهٔ یک بُردار دارای جهت ثابت اما با مدول متغیر، در دو جهت از صفر تا حداکثر، نمایش هندسی این حالت داده شده است. با ایجاد یک عدم تعادل با یک ضربه در یکی از دو جهات ممکن گردش، یکی از دو گشتاورهای چرخشی بر دیگری پیشی می‌گیرد و تا آن اندازه افزایش می‌یابد که سرعت گردش بسرعت مربوط به همزمانی تثبیت شده بوسیلهٔ فرکانس جریان تغذیه (استاتور) می‌رسد.

برای قدرتهای کوچک، این موتور با دست راه‌اندازی می‌شد، اما برای قدرتهای بزرگ می‌بایست از دینام الکترومغناطیسی استفاده شود، و بنابراین، آن را به کمک یک منبع کمکی جریان مستقیم، مثلاً آکومولاتور، به‌طور موقتی همچون موتوری به‌کار می‌انداختند.

در واقع موتور همزمان تنها برای قدرتهای بسیار ضعیف مفید بود، یا برعکس، برای گروههای تبدیل‌کننده جریان متناوب به جریان مستقیم.

بااین‌همه، از همان زمان موتورهای دارای جریان مستقیم و مجهز به کلکتور گرام-را با جریان

متناوب تغذیه می‌کردند. تنها کافی بود تحریک مغناطیسهای برقی القاگر با اتصال زنجیری انجام پذیرد. جهت جریان همزمان، هم در القاگر و هم در القاگر معکوس می‌شد و گشتاور دوران همواره در یک جهت تأثیر می‌کرد. بااین‌حال کموتاسیون، دشوارتر و مستلزم استفاده از کفشکهای قطبی متورق بود تا اتلاف جریان فوکو کاهش یابد؛ نتیجه‌ای که زیمنس در سال ۱۸۸۴ بدان رسیده بود. موتور با اتصال زنجیری هم مثل موتور با جریان مستقیم، ویژگی جالب خود را در ایجاد گشتاور دورانی نیرومندی برای راه‌اندازی نشان داد، مزایایی که در موتور متناوب دارای کلکتور هم دیده می‌شد.

در سالهای ۱۸۸۷ ـ ۱۸۸۹ آقای ایلایهو تامسن موتور جدیدی اندیشید که به موتور دفعی شهرت یافت. سیستم آن شامل تغذیهٔ القاگر با جریان متناوب و اتصال کوتاه جاروبکهایی بود که با یکدیگر روی خط بی‌اثر فرجهٔ مناسبی داشتند. بدین ترتیب، یک گشتاور حرکت‌دهنده پدید می‌آمد. زمانی‌که القاگیر بسرعت اسمی کار خود دست می‌یافت، تیغه‌های کلکتور بوسیلهٔ یک مفتول متحرک، اتصال کوتاه می‌یافتند و اتلاف برخاسته از اصطکاک از میان می‌رفت. در واقع طرز کار آن با موتور القایی یکی است.

آقای اتکینسون در سال ۱۸۸۸ با افزودن سیم‌پیچ دوم القاگر، این نوع موتور را تکمیل کرد. بدین‌ترتیب، معکوس شدن جهت حرکت ممکن شد و نیز از دو سیم‌پیچی ۹۰ درجه که یکی را «میدان» نامید که کار کموتاسیون را آسان می‌کرد استفاده کرد.

این مدلها تنها قدرتهای ضعیفی تولید می‌کردند و با مدارهای عمومی روشن‌سازی متصل می‌شدند. آنها نمونه‌های بسیار مشخص انواع ماشینهای کلاسیک آن زمان را تشکیل می‌دادند بدون اینکه حتی اصل ساختمانی آنها دست‌کاری شده باشد و پیش از آنکه چند سال بعد موتورهای دارای میدان گردان تغییری در آنها بدهند.

به‌سوی جریانهای چند فاز: بااین‌همه، پیش از آنکه در آستانهٔ سالهای ۱۸۹۰ بدان دست یابند، تکنیک دیگری نیز می‌بایست تسخیر می‌شد که در آینده در رشته‌های تولید، انتقال و توزیع جریان برق، در ردهٔ نخست عوامل تحول همهٔ تکنیکهای سدهٔ بیستم قرار می‌گرفت. بحث دربارهٔ تکثیر شکلهای جریان متناوب با به‌کارگیری جریانهای چند فاز است.

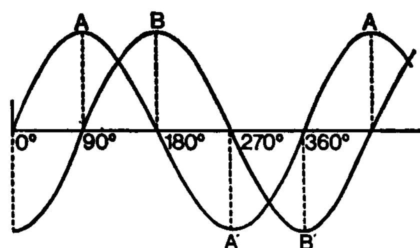
تولید جریانهای چند فازی حتی پیش از آنکه طرح شکل آن روشن شده باشد آغاز شده بود. به یاد آوریم که در این زمان ماشینهای الکترومغناطیسی، مانند ماشین پیکسی، یا ماشین کلارک پیش‌نمونهٔ ماشینهای دیگری شدند که تولید جریان متناوب می‌کردند و با یک‌سوی کردن

این جریان بوسیلهٔ کموتاتوری که روی محور ماشین قرار داده می‌شد، جریان مستقیمی به‌دست می‌آمد. نخستین مولدهای بزرگ الکترومغناطیسی مناسب کارگاه، مانند ماشینهای مریتانس یا هولمز تولید جریان متناوب یا موجواره‌ای می‌کردند که مستقیماً به لامپهای قوسی وصل می‌شدند. بااین‌حال، همان‌طورکه دیده شده است، هنوز گرایش به جریان مستقیم قوی بود درحالی‌که مثلاً موتورهای نخستین و نیز لامپهای اولیه روشنایی به‌کارگرفته شده بودند وکاربردهای برق از رشته‌های گالوانوپلاستی و الکترومتالورژی فراتر رفته بود. اتومبیلهای برقی نیزگویا در سالهای نخست به برق مستقیم نیاز داشتند، و درکشمکش تلخی که در سالهای ۱۸۸۰ بر سر مناسبترین شکل جریان برای انتقال برق درگرفت، درحالی‌که در این لزوم آشکار یک استدلال تکمیلی خوابیده بود، طرفداران برق مستقیم تصورکردند که بدرستی ثابت می‌کنند که: «انتقال انرژی به‌شکل برق با جریان مستقیم انجام خواهد شد نه با جریانی دیگر.»

بااین‌حال، طرفداران برق متناوب که طی چندین سال فقط پشتیبانی هواداران بسیار صمیمی خود را داشتند عوامل پیروزی خود را در نوسازی سه عنصر بنیادین یک سیستم جدید یافتند: مولدهای با جریان چند فاز؛ موتورهایی که با این نوع جریان کار کنند؛ و سرانجام برای اینکه انتقال برق فشار قوی از لحاظ اقتصادی قابل قبول افتد، ترانسفورماتور استاتیک لوسین گولار و جان گیبس. تأکید می‌کنیم که پیدایش همزمان این سه جزء متشکله بود که انگیزهٔ تحول به‌سوی سیستم نوین کاربرد شد. در واقع در اینجا با تأثیر علت بر معلول، آلترناتورهای با جریان چند فاز در پیدایش موتورها روبه‌رو هستیم، که فرآیند معمولی است، موتور دینامی جز در صورت امکان تولید چنین جریانهایی نمی‌توانست مطرح شود. اختراع ترانسفورماتور استاتیک پدیدهٔ مجزایی بود، اما پیشرفت آن طبعاً بستگی شدیدی به دستگاه پیشین داشته است.

در سال ۱۸۷۷ آقایان گرام و لونتن بدون اینکه با جریانهای اولیه چند فازی آشنا باشند آلترناتور خودشان که دندهٔ واسطهٔ آن مغناطیسی بود برای تغذیهٔ شمعهای یابلوچکوف، جریان چند فازی ایجاد کردند. دنده واسطهٔ مغناطیسی مولد گرام، القاگر گردانی بود که هشت قطب آن متناوباً شمال و جنوب بودند. دیده شد که سیم‌پیچهای القاگیر، دور یک هسته حلقوی ردیف شده بودند و چهار برابر قطبهای القاگر بودند تا هیچ فضای خالی باقی نماند. آنها به‌طوری وصل شده بودند که چهار گروه تشکیل می‌دادند و گروه‌های قرقره‌ها بین آنها قرار داشتند، به‌طوری‌که در سراسر این دایره، یک‌نواخت توزیع شده بودند. هر گروه القاگیر، مدار یک شمع برقی را تغذیه می‌کرد.

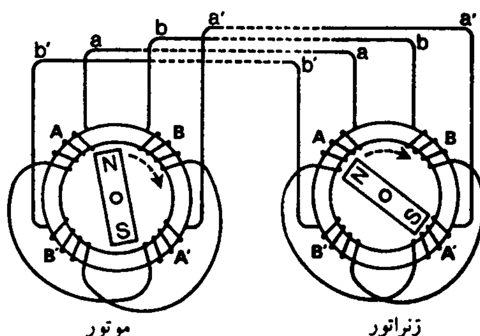
تنها کافی است به ترتیب هندسی این هیئت دقت کنیم تا متوجه شویم که در هر یک از چهار



شکل ۴۸.نمایهٔ یک جریان متناوب دو فاز ربع دور از دید *Sylvanus Thompson*.

قرقره، جریان القاگیر یک‌چهارم دوره با قرقره‌های مجاور خود تفاوت دارد (شکل ۴۸). آقای گرام، آلترناتوری ساخته بود که چهار مدار الکتریکی مختلف تهیه می‌کرد. هر یک از این مدارها تشکیل حلقه‌ای می‌داد که شمعی روی آن جاسازی شده بود. گرام یک راه‌حل خوب الکترومکانیکی را دریافته بود. وی به تحلیل ژرف این پدیده نیندیشند و بدون شک نمی‌توانست هم بدین کار بپردازد. ازسوی‌دیگر، وی توانست چهار جریان با اختلاف فاز تولید کند نه جریان چند فازی بدان معنی که بعدها مصطلح شد. بخصوص برای وی این مسأله که چهار سیم را به بستهای یک موتور دینامی مربوط کند که القاگیر ثابت (استاتور) همان نوع سیم‌پیچی القاگیر مولد را داشته باشد، مطرح نبود (شکل ۴۹).

چند سال بعد، تنها فیزیکدانان متوجه شدند که نه‌تنها ایجاد جریانهای چند فازی ممکن است



شکل ۴۹.نمایهٔ تغذیهٔ موتوری با جریان دو فازی.

قرقره‌های القاگیر متناسب با قطر حلقه به‌طور جفتی بسته شده‌اند. در قرقرهٔ BB' جریان متناوبی پدید می‌آید که ربع دور روی جریان قرقرهٔ AA' با هم فاصله دارند.

بلکه حتی چنین جریانی برای صنعت لازم است. آقای گوردون انگلیسی در سال ۱۸۸۳ در محل پادینگتن[1] نزدیکی لندن، آلترناتورهای دو فازی بزرگی نصب کرد. آقای وین[2] در سال ۱۸۸۶ گویا از نخستین کسانی بود که نوعی سیستم توزیع برق با جریانهای چند فازی را پایه گذارد، گر چه آن را هم *périphrase* می‌نامیدند. در حدود سال ۱۸۹۰ چندین آلترناتور ساخته شد که جریان چند فازی می‌داد و از این زمان است که استفادهٔ منظم از این تکنیک آغاز شد.

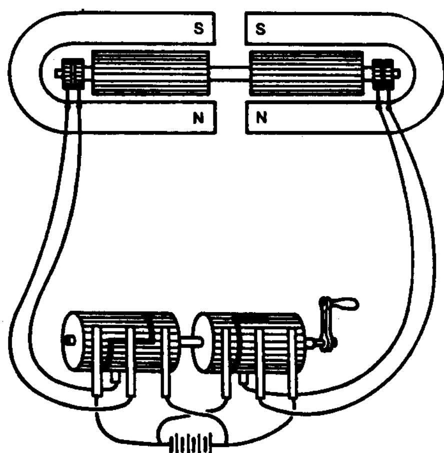
این گرایش تازه با ساخت موتورهایی قوام گرفت که می‌توانستند مستقیماً چنین جریانهایی ـ بیشتر سه فاز ـ تولید کنند. این نوع موتورها زمانی به بازار آمدند که مفهوم میدانهای گردان، که شصت سال سابقه داشت، تعریف شده بود.

میدان گردان: در حوالی سال ۱۸۲۵ فیزیکدانان چندی، تقریباً همزمان، متوجه شدند که یک دیسک برنجی اگر حول مرکز خود در میدان یک عقربهٔ مغناطیسی بگردد، این عقربه از وضع متعادل خود خارج می‌شود. چنانچه سرعت گردش، بسیار زیاد شود، خود عقربه به گردش درمی‌آید. بررسیهای نخستین این جریان در سال ۱۸۲۴ بوسیلهٔ هنری گمبی[3]، بهترین سازندهٔ ابزارهای علمی در اوایل سدهٔ نوزدهم در فرانسه، انجام گرفت و پس از وی آقای آراگو بود که در همان سال این پدیده را به آکادمی علوم فرانسه اطلاع داد. در این زمان این پدیده با عنوان مغناطیس گردش شهرت یافت. فیزیکدانان انگلیسی و پیش از همه آقایان چارلز ببیج و جان هرشل در سال بعد نشان دادند که این پدیده ممکن است معکوس باشد: آهنربایی که می‌گردد یک دیسک مسی نزدیک خود را می‌گرداند. تقریباً همهٔ فیزیکدانانی که بدین مسأله تازه، علاقه‌مند شده بودند، آزمایشهای خود را دنبال کردند و نتایج تکمیلی دیگری به‌دست آوردند. اما فاراده بود که بررسی کاملی از آن به‌عمل آورد و در نوشته‌های خود دربارهٔ القاء، نخستین تحلیل را از آنچه که بعدها جریان فوکو خوانده شد، به‌دست داد.

در ابتدا از این دستاوردهای عملی هیچ‌گونه استفاده عملی نکردند و با دنبال کردن تاریخ این دستگاههای گردان تا آلترناتورها، بخوبی فهمیده می‌شود که چگونه پیش از آنکه بدان برسند راه هموار شده بود. آلترناتورهای ساده و موتورهای همزمانی که بخوبی طراحی شده بودند راه را برای پیشرفت به‌سوی اشکال دیگر جریان و همزمان به سوی موتورهای دارای میدان گردان باز کرده بودند.

در رشتهٔ موتورها این مرحلهٔ تازه لااقل در ده سال به پایان رسید. این مرحله راه به دوران کارهای دیره یافت، گر چه وی پیدایش موتورهای سه فازی همزمان را که رفته‌رفته جای بسیار مهمی در

1. Paddington 2. F. Wynne 3. H. Gambey



شکل ۵۰.نمایهٔ مارسل دپره از جریانهای دو فاز (۱۸۸۰).

تکنولوژی به‌دست می‌آورده پیش‌بینی نکرد.

مغناطیس گردش در زمان فاراده تصادفاً توجهات را به خود جلب کرد. آقای فوکو مسأله را کمی زنده ساخت. وی اظهار داشت زمانی‌که یک دیسک فلزی را در یک میدان مغناطیسی می‌گردانند، جریان القایی که در دیسک ایجاد می‌شود آن را گرم می‌کند. بررسیهای دیگری فیزیکدانان به‌عمل آوردند. اما نخستین موتور القایی ساخت والتر بیلی انگلیسی در سال ۱۸۷۹، حتی مورد توجه سازندهٔ آن قرار نگرفت. وی به‌جای به‌کار گرفتن یک آهنربای گردان برای به گردش درآوردن این دیسک، دو مغناطیس برقی را عمود بر هم قرار داد و قرقره‌های آنها را متناوباً تغذیه کرد. این کار صرفاً یک آزمایش فیزیکی بود و بس.

سال ۱۸۸۰ که آقای دپره نشان داد که می‌توان با چند پیل و کمک کموتاتور دوگانه‌ای که هر بخش آن یک القاگیر ماکویی را تغذیه می‌کند (شکل ۵۰)، دوران کارهای نظری وی روی دینام، پیش از آغاز بررسیهایش دربارهٔ انتقال جریان، بود. هر دو القاگیر بر یک محور جاسازی شده بودند و فرجهٔ بین آنها برابر ۹۰ درجه بود.

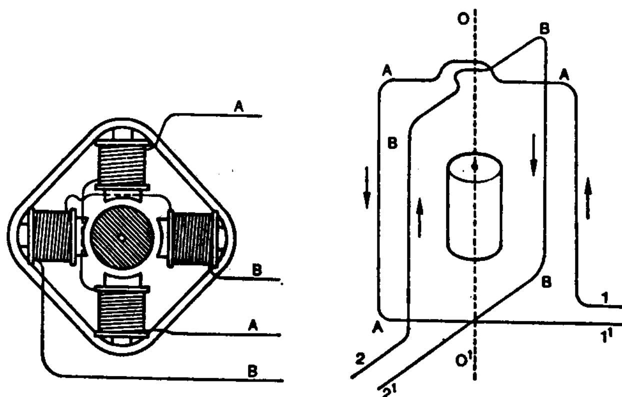
آقای دپره نفهمید که دستگاه وی نسبت به دستگاه بیلی متأخر است و شکی نیست که توجهی به دستگاه بیلی نکرده بود. کمی بعد، به سال ۱۸۸۳ فرضیه مهمی را دربارهٔ ایجاد یک میدان مغناطیسی واقعی گردان با ترکیب دو جریان متناوبی که یک ربع دور از یکدیگر فاصله

داشتند پایه گذارد. سرعت گردش برای هر تناوب جریان متناوب، یک دور بود. گرچه مفهوم میدان گردان سرانجام مشخص شد، دیده می‌شود که از زمان آراگو تادپره این حرکت تا چه اندازه تصادفی بوده است. شگفتی‌آور است که این پژوهش‌گر که دستاوردهایش استثنایی بود و در همان زمان شرایط انتقال جریان مستقیم را مشخص ساخت از این اطلاعات تازه به سود جریان متناوب بهره‌ای برنداشت. شکی نیست که این اندیشه هنوز ناپخته بود. آلترناتور مصرف چندانی نداشت و ترانسفورماتور استاتیک آقایان گولار و گیبس تا سال ۱۸۸۳ طرح دقیقی نداشت (برای توضیح بیشتر به صفحه ۴۸۲ مراجعه شود).

پژوهشهایی دربارهٔ موتورهای ناهمزمان با میدان گردان: نخستین موتورهای با میدان گردان، تنها دو سال بعد، در ۱۸۸۵ با دستهای گالیلئو فراری، که بی‌شبهه از اندیشه‌های آقایان بیلی و دپره آگاه نبود ساخته شد. اما فراری از ترانسفورماتور گولار اطلاع داشت و طرح ایجاد زاویهٔ قائمه بین قرقرهٔ تخت و تغذیه قرقرهٔ نخست (که با سیمهای ضخیمی ساخته شده بود) با جریان سیم‌پیچ ورودی ترانسفورماتور، و قرقرهٔ دوم (که با سیمهای نازکی ساخته شده بود) با جریان خروجی همان ترانسفورماتور را از ترانسفورماتور گولار اقتباس کرده بود. استوانه‌ای در محور این بازوی عرضی آویزان بود. فراری اظهار داشت که چنانچه تنها یک قرقره تغذیه شود سیلندر بی‌حرکت می‌ماند. اما زمانی‌که هر دو قرقره همزمان تغذیه شوند سیلندر حول محور عمودی خود خواهد گردید.

فراری که از این آزمایش درس گرفته بود موتور کوچکی ساخت که چهار قرقرهٔ آن به‌صورت قابی دیسک مسین را احاطه کرده بودند. هر دو جفت قرقره‌ها مقابل هم بودند و هرکدام تبدیل به یک مغناطیس برقی، با جریانهای متناوب دارای اختلاف فاز بین خود، تغذیه می‌شدند (شکل ۵۱). در این شرایط جریانهای القاگیر در دیسک سبب گردش آن حول مرکزش می‌شوند. این دستگاه تا سال ۱۸۸۸ ارائه نشد و خود موتور آن در نمایشگاه سال ۱۸۹۳ شیکاگو برای نخستین بار در معرض تماشا گذارده شد و حال آنکه نمایش تاریخی انتقال برق چند فاز در نمایشگاه فرانکفورت در سال ۱۸۹۱ انجام گرفته بود.

بااین‌حال، آقای فراری برخلاف آقای دپره این راه را ادامه داد. وی ساختمان موتورهای جدیدی را بررسی کرد و مفهوم «لغزیدن» را روشن ساخت که به‌معنی تفاوت سرعت زاویه‌ای روتور با سرعت میدان مغناطیسی است که برای پدید آمدن جریانهای القاگیر در اولی ضروری است. وی نشان داد که توان یک موتور ناهمزمان تابعی از سرعت گردش و لغزیدن است. او نظریهٔ خود را در ۱۸۹۴ یعنی زمانی اعلام داشت، که نظرات ریاضی موتورهای القایی با کوششهای فیزیکدانان



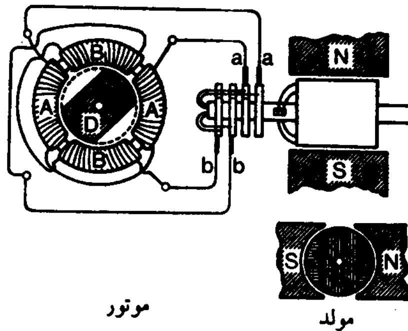
شکل ۵۱.اصول موتور ناهمزمان با میدان گردان، ساخت فرّاری.
سمت چپ: موتور سال ۱۸۸۵.دو جفت‌الکترودبا سر مشترک که جریانهای متناوب دو فازی با فاصلهٔ ربع تناوب آنها را تغذیه می‌کند. دیسک مرکزی حول محور خود می‌گردد.
سمت راست: نمایهٔ دستگاه دیگری که در همین زمان ساخته شده است. قرقره تخت AA جریان ورودی یک ترانسفورماتور را دریافت می‌کند. قرقره BB که از سیمهای نازکی است جریان خروجی را دریافت می‌کند. تحت تأثیر تنها یک جریان، سیلندر بی‌حرکت است و در اثر دو جریان، حول محور خود می‌گردد.

همه کشورها به پیشرفتی دست یافته بود.

کاربرد جریانهای چند فازی: خط مهم دیگری از پژوهشها، تقریباً در همان زمان کارهای فراری، بوسیلهٔ آقای نیکلا تسلا، فیزیکدانی از تبار کروات اما مقیم ممالک متحده امریکا، گشایش یافت. آقای چارلز س. برادلی امریکایی کمی پیش از او، بین سالهای ۱۸۸۷ تا ۱۸۸۹ اختراعات زیادی به نام خود به ثبت رسانیده بود که ازآن‌میان اصول یک موتور چند فازی و مفهوم لغزش مغناطیس بود. آلترناتور با حلقهٔ گرام ساختهٔ آقای برادلی، جریان دو فازی تولید می‌کرد و برگشت‌پذیر بود. اما از میدان گردان در آن سخنی نرفته است و بخوبی نمایان است که برادلی در نظر داشته است که توان یک ماشین گرام را افزایش دهد تا اینکه میدان تحقیق تازه‌ای باز کند. علاوه‌براین، آلترناتور وی نمی‌توانست در نقش موتور کار کند.

ساخته‌های آقای تسلا از نوع دیگری بود. در ماه مهٔ ۱۸۸۸ امتیازهای متعددی که از حدود شش ماه پیش به ثبت رسیده بودند بوسیلهٔ پاتنت آفیس[1] انتشار یافتند. مشخصات اساسی مربوط

1. Patent Office



شکل ۵۲.موتور تسلا با میدان گردان.
استاتور این موتور از دو مدار جدا از هم تشکیل شده است که مستقیماً به مدارهای روتور یک آلترناتور تولیدکننده جریان دو فازی، وصل شده‌اند. در پایین، سمت راست شکل ضربدری حلقه‌های القاگیر، هر یک مجهز به دو قرقره دیده می‌شود. روتور این موتور یک دیسک از آهن (D) است.

به وسایل گردانیدن القاگیر به توسط جریان القایی است. در یکی از این امتیازها بویژه آلترناتوری دو فازی شرح داده می‌شود. که بدون هیچ واسطه‌ای، دستگاه قرقره‌های متقارن یک موتور دو فازی را تغذیه می‌کند که روتور آن یک دیسک مسی است (شکل ۵۲). تسلا همچنین سیستمی مشابه سه فازی، مولد و موتور، را طرح کرد که آنها را علی‌البدل یکدیگر نامید.

چند ماه بعد، در نوامبر همان سال، موتوری ساخت که روتور آن بوبینی، و سیم‌پیچی ثانوی روی آن بسته شده بود. این یک موتور القایی کامل بود که تسلا در آن جریانهای متناوب حقیقی، نه جریانهای موج واره را به‌کار گرفته بود.

به‌دنبال این انتشارات، هر تکنیک تازه برای افزایش قدرت می‌کوشید. در آنها طرح موتورهای دوفازی و سه‌فازی، همزمان و ناهمزمان، با خطوط تغذیه دو فازی چهار کابلی و سه‌فازی شش کابلی دیده می‌شود، و باز در همانها امکان‌ساخت جریان دوفازی با سه کابل همراه و یک کابل مشترک برگشت جریان، و بالاخره امکان معکوس کردن جهت گردش با تغییر ترتیب فازها وجود داشت.

آقای‌تسلا در سال ۱۸۸۹ پژوهشهای خود را دربارهٔ راه‌اندازی موتورهای همزمان دوفازی با «ایجاد فازها» منتشرکرد، بدین معنی که بوسیلهٔ جریان متناوب، گردش میدان بتدریج زیاد می‌شود تا به رژیم معمول آن برسد، و طی این جریان، تناوب منظم قطبها حفظ می‌شود. وی در سالهای بعد اشکال گوناگون موتورها را بررسی کرد تا در سال ۱۸۹۱ به موتور شش قطبی دست یافت که

در آن، ایجاد فازهای مصنوعی بوسیلهٔ تنها بازی قرقره‌ها و نیز خازنی که یک سیم‌پیچ ثانوی آن را تحریک می‌کرد، عملی می‌شد.

اختراعات تسلا، شرکت وستینگهاوس را موفق ساخت.

طی این سالهای سرنوشت‌ساز، شمار فیزیکدانان و تکنسین‌هایی که در کار به خدمت گرفتن جریانهای متناوب بودند فزونی می‌یافت. دستاوردهای آنها متفاوت بودند و در مجموع، آزادی وسیعی برای انتخاب ایجاد شده بود که پیوسته متمرکزتر می‌شد. تحلیل بسیار اصیلی از آقای هازل‌واندر[1] از اهالی بادن[2] آلمان دربارهٔ طرز تغذیهٔ یک موتور بوسیلهٔ جریان مستقیم یک دینام، در سال ۱۸۸۷، چگونگی پدیده‌هایی را که در هر ماشین رخ می‌دهد به‌شکل گیرایی شرح می‌دهد.

استدلال آقای هازل‌واندر چنین بود: در القاگیر یک دینام، جریان متناوب چند فازی تولید می‌شود که کموتاتور آن را به جریان مستقیمی، که در واقع ادامهٔ بسیار نزدیک جریان دارای همان جهت است، تبدیل می‌کند. این پدیده در ورود به دستگاه، حالت معکوس دارد؛ جریان مستقیم موجواره‌ای که انتقال یافته است به توسط کموتاتور گیرنده، به ردیفی از جریانهای متناوب، تجزیه می‌شود. از این مقدمه، نتیجه می‌گیریم که پیچیده کردن ماشینها کار بیهوده‌ای است و انتقال جریانهای متناوب بدون تغییر دادن شکل آنها ساده‌تر است. این استدلال گویا برای معاصران وی بسیار عجیب بوده است. آقای هازل‌واندر ماشینی با جریان سه‌فازی ساخت که یک القاگیر حلقوی و دوازده قرقره داشت که در سه مدار دسته‌بندی شده بودند و یک القاگر متحرک، که در وسط قطب قرار می‌گرفت. یک کلکتور ثانوی القاگر را تحریک می‌کرد. این ماشین که در نقش موتور کار می‌کرد و در نمایشگاه سال ۱۸۹۱ فرانکفورت به نمایش گذارده شد، نه‌تنها به‌علت طرز ساخت آن که از حد تکنیک متحول آن روز بسیار پیشرفته‌تر بود، تاریخی شد، بلکه بدین علت هم که یک قدرت پژوهشی را نشان می‌داد که برای تثبیت خود از پای نمی‌نشست.

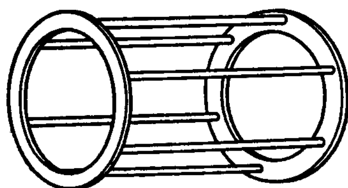
مرحلهٔ پایانی این دورهٔ همکاری را آقای فون دالیوو ـ دابراوولسکی سرمهندس مؤسسه مهم آلگماینه الکتریسیتات گزلشافت[3] آلمان کامل کرد. وی با دنبال کردن پژوهشهای فراری و تسلا، ضمناً در دو سال ۱۸۸۹ و ۱۸۹۰ بررسی کاملی از ترانسفورماتورهای سه‌فازی و استفاده از یک سیم برگشتی مشترک در سه مدار به‌عمل آورد. این پژوهشها اساساً راه‌حل انتقال نیرو به کمک جریانهای متناوب را به‌دست دادند.

---

1. Haselwander

۲. Baden: سرزمینی در جنوب‌غربی کشور آلمان، در سمت راست رودخانه راین قرار دارد. ـ م.

3. Allgemeine Electricität Gesellschaft



شکل ۵۳.نمایه یک روتور قفسی یک موتور چند فازی با میدان گردان.

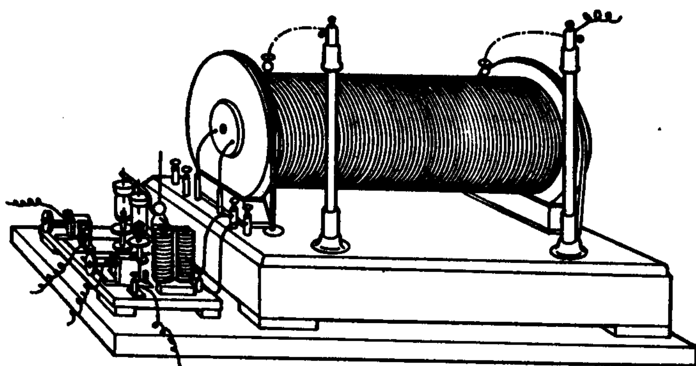
وی همچنین به مسأله اشکال عملی مناسب برای قطعات گردنده موتور فراری نیز توجه داشت، و بر آن شد که سیستم قرقرهٔ روتور آن را با مکانیسمی از میله‌ها یا نوارهای مسی که با فواصلی روی دوره استوانه قرار داده می‌شدند و ایجاد اتصال کوتاه بین آنها بوسیلهٔ رساناهایی که در دو سر هر یک جوش داده می‌شدند، تعویض کند. ازجمله ترتیبات گوناگونی که اندیشیده بود یکی به‌طور کلی مورد قبول قرار گرفت و مناسب شکل ظاهریش، به قفسی شهرت یافت (شکل ۵۳).

وی در جریان پژوهشهایش، روتورهای متورق سیم‌پیچی شده با قرقره‌های عایق‌شده ساخت و از مقاومتهای مایع استفاده کرد که آنها را با اتصال ستاره، روی ثانوی متحرک، برای راه‌اندازی نصب می‌نمود.

محقق است که دستاوردهای دالیوو- دابراوولسکی آخرین نقطهٔ تحول مجموعهٔ همهٔ این دشواریها نیست بلکه آنها مرحله‌ای را مشخص می‌کنند که با نمایشگاه سال ۱۸۹۱ فرانکفورت، پایان پرشکوهی داشته است.

انتقال جریان متناوب: ژنراتورها و موتورهای دینامی، در دوانتهای این خط، می‌توانستند دستگاههای کارایی برای صنعتی کردن جریان متناوب باشند. با این حال، خود مسألهٔ انتقال این جریان به فواصل دور، که در آن زمان تنها برای صد یا دویست کیلومتر مطرح بود، ازنظر اقتصادی تنها زمانی می‌توانست پیش کشیده شود که وسایل فنی برای انتقال جریان با فشار قوی در دسترس باشد. برای اینکه به چندین ده هزار ولت دست یابند نمی‌توانستند بر یک ردیف ژنراتورهایی که به‌طور زنجیری با یکدیگر دوبه‌دو اتصال داشتند و جریان خود را مستقیماً تحویل خط می‌دادند تکیه کنند.

محقق است که آقای توری برای انتقال جریان مستقیم چنین سیستمی ساخته بود. در این سیستم در محل تولیدجریان، دینامهای متعددی به‌طور زنجیری به یکدیگر وصل شده بودند. در مقصد نیز ازگروه‌های موتور- مولدهایی استفاده می‌شد که آنها هم برای کاهش فشار، به‌طور زنجیری با یکدیگر مربوط می‌شدند. هر دینام پایانی، جریانی با ولتاژ قابل استفاده، مثلاً برای روشنایی،



شکل ۵۴. قرقره القای به‌اصطلاح رومکورف (حدود ۱۸۵۰).
در بیرون شکل، سیم‌پیچی ورودی با سیم ضخیم دیده می‌شود؛ در وسط، دنبالهٔ قرقرهٔ خروجی است. در سمت چپ تصویر، لرزنده نشان‌داده شده است.

تحویل می‌داد.

به‌کارگیری این روش برای جریان متناوب دشوار بود. برای ایجاد اتصال زنجیری آلترناتورها می‌بایست با فرکانسهای یکسان و همراه فاز عمل کرد. دشواری این کار سبب شد که کاربرد جریان متناوب به مدت پانزده سال به‌تعویق افتد. در حالت عکس، گرچه بررسی و پیشرفت دستگاههای چند فازی با جهشهایی انجام شد، این بخاطر راه‌حل ساده و مؤثری بود که بین سالهای ۱۸۸۲ ـ ۱۸۸۴ یافت شد. این راه‌حل همانا موتورهای استاتیکی بود که در ابتدا مولدهای ثانوی نامیده می‌شدند اما پس از زمان کوتاهی آنها را ترانسفورماتور نامیدند.

مولدهای ثانوی: این مولد، دستگاه جدیدی نبود؛ تقلیدی از قرقرهٔ القای آقایان ماسون[1] و برگه بود که به قرقرهٔ رومکورف شهرت داشت، زیرا این ابزارساز پرآوازه، پس از تکمیل، آن را در کاتالوگ خود گذاشته بود (شکل ۵۴). این قرقره که در جریان مستقیم (تنها جریان آن زمان) به‌کار می‌رفت لرزنده‌ای داشت که جریان برق ورودی را مکرراً قطع و وصل می‌کرد، و این به‌معنای تغییرات میدان مغناطیسی و در نتیجه القای جریانی با ولتاژ بسیار بالا در خروجی ترانسفورماتور بود. هر دو سیم‌پیچی که دقیقاً عایق شده بودند یک هستهٔ مغناطیسی را احاطه می‌کردند. ورودی، سیم‌پیچ ضخیمی بود که بیش از چند دور نداشت؛ خروجی، با سیم نازکی تهیه شده بود و تعداد زیادی دور داشت. جریان القایی، قدرت بسیار کم اما ولتاژ بسیار بالایی داشت.

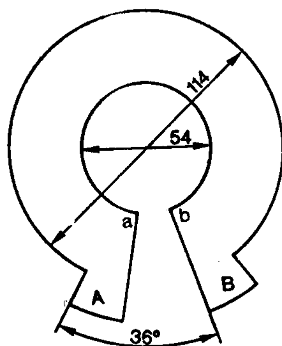
1. Masson

قرقرهٔ رومکورف تا آن زمان یک وسیلهٔ آزمایشگاهی بود که کاربرد آن در رشته‌هایی نظیر کارهای عمومی، معادن و ارتش روبه افزایش داشت. در سالهای ۱۸۶۰ آقای لنوار از آن برای تأمین اشتعال مدلهای نخستین موتورگازی خود بهره گرفته بود. اینکه الکتریسین‌ها آن را هنوز در فهرست وسایل خود نگنجانیده بودند بدین دلیل است که این وسیله برای آنها، در دخل و تصرف در جریان مستقیم، کارایی چندانی نداشت. اما آنان بزودی دریافتند که در دستکاری جریان متناوب، قرقرهٔ رومکورف کمک خواهد بود. وسیلهٔ لرزنده بیهوده ماند زیرا خود شکل جریانی که از سیم‌پیچ ورودی می‌گذشت سبب تغییر میدان می‌شد. بدین‌ترتیب، مجموعهٔ بسیار ساده‌ای در اختیار آنها بود که از دو دستگاه قرقره محیط بر یک هسته از ورق آهن تشکیل می‌شد و هیچ قطعهٔ متحرکی نداشت و ولتاژ، به تناسب تعداد دورهای این دو به یکدیگر افزایش می‌یافت. ثابت تقارن، که همچون دیگر، ماشینهای برقی عمل می‌کرد، می‌توانست برای رساندن ولتاژ از مقدار مورد انتقال به ولتاژ مناسب دستگاه به‌کار گرفته شود.

این طرح جدید انتقال، بسیار ساده بود. بااین‌همه، تنها در زمینهٔ کاربردی جریانهای متناوب می‌توانست عملی شود. اما تیزبینی آقایان لوسین‌گولار و جان دیکسون گیبس سبب شد که درست در زمانی‌که رفته‌رفته نیاز به آن احساس می‌شد بدین راه‌حل توجه کنند. از نظر مصالح کاری، روشن نبود که این راه‌حل، مناسبترین است و یا حتی عملی است یا نه. همهٔ پدیده‌های پارازیتی که کاربرد آن را پوچ می‌کردند نادیده گرفته شده بودند: تلفات مغناطیسی؛ تلفات ناشی ازگرم شدن؛ نوع هسته؛ هیأت سیم‌پیچ که آنها هم مشکلاتی، گرچه جزئی بودند؛ اما می‌بایست با آزمایشها برطرف شوند زیرا دانش نظری در این رشته هنوز ضعیف بود.

دو همکار فوق کار خود را در این زمینه در سال ۱۸۸۲ آغاز کردند. هدف آنها امکان تغذیهٔ خطوط طویل روشنایی با برق یعنی خطوطی بود که برای نخستین متروی لندن به ۲۵ کیلومتر بالغ می‌شد و چهار ایستگاه فرعی آن شمعهای قوسی یابلوچکوف و ۱۴۰ لامپ روشنایی سوان را روشن می‌کردند و بر رویهم می‌بایست ۱۳۰ اسب نیرو توزیع می‌شد. عنوان اختراع ثبت شدهٔ ۷ اکتبر ۱۸۸۲ آنها ضمناً بسیارگویا بود. این اختراع، سیستمی برای انتقال نیروی برق به فواصل دور بود. در این مورد انتقال می‌بایست با ۳۰۰۰ ولت انجام گیرد که یک «مولد اصلی» آن را تأمین می‌کرد.

در هر نقطه کاربرد، یک «مولد فرعی» ولتاژ را برای تغذیه لامپها به ۱۰۰ ولت پایین می‌آورد.

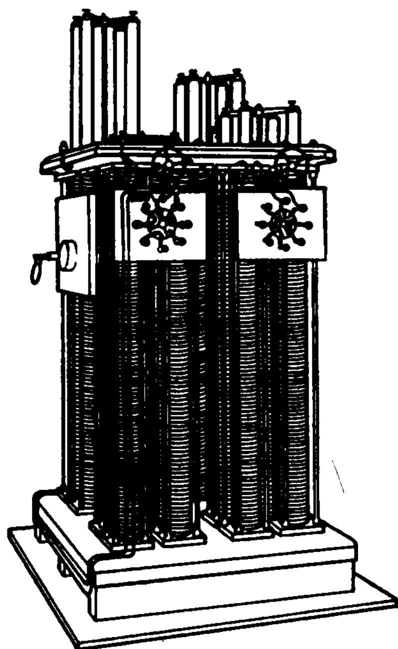


شکل ۵۵.نمایهٔ ترانسفورماتور گولار ـ گیبس.
این ترانسفورماتور از ترکیب **قطعات** زیر: زبانهٔ A یکی که به زبانهٔ B دیگری اتصال یافته است. دو پروانه که بدین‌ترتیب پیرامون یک هسته تشکیل شده‌اند یکی با مادهٔ عایق واسطه، در دیگری جا گرفته است.

نمایشگاه برقی تورینو: آقای گولار از فرصت نمایشگاه برقی تورینو (سال ۱۸۸۴) برای ارائه دستگاه خود به مردم استفاده کرد. دستگاه وی با حوادث متعددی روبه‌رو شد که برخاسته از سستی مصالح در دسترس وی بود. وی که فاقد اعتبار مالی بود ناگزیر از اوراق کردن وسایل لندن برای حمل به تورینو و آماده‌سازی ۸۰ کیلومتر سیم مسی بود که در لحظات آخر به وی رسید، و غیره. وانگهی بیماری وبا که در تورینو بیداد می‌کرد نیز بر مشکلات دسترسی به مصالح و کارکنان پیش‌بینی ناشدنی می‌افزود. همهٔ کارهای هیئت داوران با عجله در دو روز پایانی نمایشگاه انجام گرفت، زیرا به‌علت همه‌گیری و با ناچار از تعطیل هرچه زودتر نمایشگاه شدند. بااین‌همهٔ آقای گولار، در لحظه واقعاً واپسین، توانست فاصلهٔ چهل کیلومتری نمایشگاه تا سالن ضیافت پایان آن را با برق روشن سازد.

این وسایل اولیه برای قدرت یک تا یک‌ونیم اسب طراحی شده بودند. هر دو سیم‌پیچ دور هسته‌ای عمودی، که دسته‌ای از سیمهای آهنی بود، پشت سر هم پیچیده شده بودند. سیم‌پیچها از ردیف حلقه‌های باز و تخت مسی تشکیل می‌شدند که هر سر آنها به‌یک چنگک خمیده وصل شده بود تا بتوان حلقه‌ها را دو به‌دو با یکدیگر متصل ساخت (شکل ۵۵). عایق‌سازی آنها با حلقه‌های مقوایی پوشیده از لاک انجام گرفته بود. این حلقه‌ها در فواصل قطعات مسی و بوسیله لوله‌ای از ابونیت که هستهٔ مغناطیسی را در خود می‌گرفت جاگذاری شده بودند.

چهار ستون مشابه روی سکویی چوبی گذاشته شده بود و در صورت نیاز می‌توانستند به‌طور



شکل ۵۶.ترانسفورماتور گولار ـ گیبس.
قطعات روی هم چیده (شکل ۵۵) روی لوله‌ای از ابونیت سوار شده‌اند. هسته‌ای استوانه‌ای شکل از سیمهای آهنی، درون این لوله می‌لغزد. در شکل دیده می‌شود که این مفتولها کم‌وبیش فرورفته‌اند تا توان ترانسفورماتور تنظیم باشد، چرخهای حرکت و رئوستاهای تنظیم نیز در شکل نمایانیده شده‌اند.

زنجیری یا موازی با یکدیگر اتصال یابند. قدرت دستگاه با فرو بردن کم‌وبیش هسته‌ها در لولهٔ ابونیتی آنها، بوسیله یک سیستم پیچ‌ومهره تغییر می‌کرد. سرانجام رئوستایی که به سیم‌پیچ ورودی متصل بود، تغییر دادن ولتاژ را ممکن می‌ساخت (شکل ۵۶).

مقدار نشت مغناطیس از چنین هسته‌های راست گوشه‌ای چشمگیر بود؛ بااین‌همه بازده دستگاه بین ۹۰ تا ۹۵٪ تثبیت شده بود. این نمایش با رفع آن‌همه دشواریهایی که با آنها برخورد داشت برای خود گولار یک پیروزی بود، گرچه انگیزهٔ گفت‌وگوهای فراوانی شد.

برای اینکه اهمیت این عمل را ارزیابی کنیم باید به یادآوریم که در همان اوان کارهای بسیار نمایشی آقای دپره دربارهٔ انتقال جریان مستقیم مطرح بود. برای کوتاه کردن خط آزمایشی میان

پاریس و کریل، نقطه‌ای با فاصلهٔ رفت و برگشتی دقیقاً ۸۰ کیلومتر از تورینو انتخاب شد. محافل الکتریسین‌ها در تمام مدت این سالهای شکوفا در تب و تاب بودند و نمایشگاهها محل رقابتهای تنگاتنگ.

نتایج نمایش گولار و بویژه ساختمان مولدهای فرعی وی و نیز بازده سنجیدهٔ دستگاهش اعتراضهایی نیز به‌دنبال داشت. گولار با مخالفان خود با همان سرسختی می‌جنگید که با دشمنان مادی خود. شدت این نبرد برای وی حیاتی بود و وی را در جریان یک بیماری مغزی به کوری و سپس در ۱۸۸۸ به مرگ کشانید.

کاملاً نمایان است که شخصیت گولار را می‌توان از نظر عصبانیت و تحریک‌پذیری شدید و نیز از نظر اطلاعات علمی و قدرت فنی با گرام مقایسه کرد. گولار هم مانند گرام، در جهت حل مسائل نسبتاً ساده‌ای که در محافل فنی مورد بحث و امعان نظر بودند، تیزبینی خاصی داشت؛ وی که بی‌درنگ وارد میدان عمل شد، در لندن با گیبس یک شرکت صنعتی با نام National Society for the Distribution of Electricity by Secondary Generators تأسیس کرد و اینکه وی شخصاً به موفقیتهای درخشانی، مانند گرام دست نیافت بدین علت بود که عوامل گوناگونی تا حدودی سد کارهای وی شدند.

بررسیهای نظری گفت‌وگوها: نمایش ژنراتورهای فرعی گولار در تورینو، با همهٔ اعتراضهایی که برانگیخت، کاری سرنوشت‌ساز بود. در واقع، گالیلئو فراری توانست مدت چهار روز روی آنها شخصاً آزمایش کند. وی بدین دستگاه احاطه یافت و چند ماه بعد، در فوریهٔ ۱۸۸۵ یادداشت طویلی انتشار داد و در آن، نخست یک بررسی نظری از ترانسفورماتورها کرده بود که نخستین کار در این‌باره به‌شمار می‌رود. او در این یادداشت انواع پدیده‌هایی را که در ترانسفورماتور رخ می‌دهند و تأثیر عوامل گوناگون نظیر سیستم سیم‌پیچیها، ساختمان و مقاومت هسته‌ها را مشخص می‌ساخت و نیز نشان می‌داد که چگونه مشخصات آنها را می‌توان محاسبه کرد. وی علاوه‌برآن، نتیجه خاص خود را به میان گذاشت و نشان داد که اندازه‌گیریهایی که به کمک الکترومتر یا الکترودینامومتر به‌دست آمده‌اند، کمی عجولانه انجام شده‌اند و برای مقادیر گوناگون تحقیق شده ارقامی می‌دهند که با ارقامی که با روش کالری‌سنجی خود به‌دست آورده است نمی‌خواند. او یادداشتهای خود را به نکته‌ای دربارهٔ اصلاح ساختمان هسته‌ها پایان می‌دهد ـ اصلاحی که گولار برای بهتر کردن بازده، آن را انجام داد. آقای گولار به‌جای یک دسته سیمهای آهنی، یک کندهٔ چوبی استوانه‌ای که تنها با سیمهای آهنی پوشیده شده بود به‌کار گرفت تا جریانهای فوکو را کاهش دهد. آقای فراری ادعا کرد

که گولار با این تعویض «دستگاه خود را محسوساً خراب کرده است».

سرانجام، کار دیرپای آقای فراری و همه گفت‌وگوهایی که پیرامون اختراع گولار دور می‌زدند با پیروزی این اختراع پایان پذیرفت. در سال ۱۸۸۳ مجلهٔ *Electrical Review* در یک مجادله به سود پیشگامی آقای فولر فیزیکدان رأی داد که در سال ۱۸۷۹ نوعی ترانسفورماتور طرح کرده بود که بر همان پایه قرار داشت. بااین‌حال، روشن است که گولار و گیبس نخستین کسانی بودند که توانستند برای صنعت این دستگاه را بسازند.

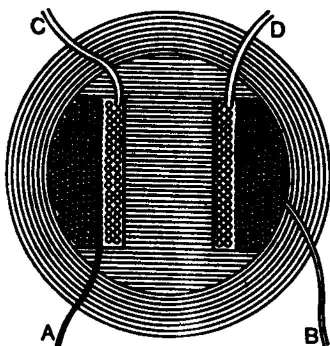
آقای فراری در یادداشتهایش بین مولدهای فرعی گولار و ترانسفورماتورها مقایسه‌ای کرده است. اصطلاح ترانسفورماتور در سال ۱۸۸۵ به توسط سه فیزیکدان با نامهای زیپرنوفسکی[۱]، دری[۲] و بلاتی[۳] با مباهات وضع شده بود. ساختمان این ترانسفورماتورها دقیقاً برعکس ساختمانی بود که گولار عمل می‌کرد. دستگاههای بوبینی مدارهای اولیه و ثانوی حلقوی شکل بودند و مدار مغناطیسی که جانشین هسته شده بود سیم‌پیچی از آهن بود که از درون به بیرون حلقه راه می‌یافت. ترتیب میدان مغناطیس بسته را آقایان بلاتی به خود نسبت داده بود، اما گولار نه‌تنها با این ادعا ـ با مراجعهٔ به فولر ـ مخالفت ورزید بلکه کارایی آن را نیز نمی‌پذیرفت.

تکامل ترانسفورماتورها: مرگ گولار گویا به همهٔ این گفت‌وگوها پایان داد و دستگاه ترانسفورماتور راه تکامل می‌سپرد گرچه به‌شکل قطعی خود دست نیافت. هسته آن از ورقهای آهن نرم ساخته شده بود و شکل آن به سلیقهٔ سازندهٔ آن بستگی داشت. آقایان دیک[۴] و کندی[۵] شکل H را که تقلیدی از القاگیر ماکویی زیمنس بود پذیرفتند (شکل ۵۷). آقای فرانتی برای نخستین بار نوعی اختلاط ورقهای آهن را که درون دستگاههای استوانه‌ای قرقره‌ها قرار می‌داد به کاربرد و بنابراین، دنباله‌های آنها دور خود آنها برگشته می‌شد. شرکت امریکایی وستینگهاوس با خریدن امتیاز اختراع‌گولار و گیبس، نخستین مؤسسه‌ای بود که ترانسفورماتورهای جوشدار ساخت. این دستگاهها از صفحاتی تشکیل می‌شدند که به‌شکل چهارگوش بریده شده بودند و دو سوراخ مربعی در آنها ایجاد می‌کردند تا قرقره‌های ورودی و خروجی در میان آنها پیچیده شوند.

پس‌از گذشت مدت اندکی، دستگاه ترانسفورماتور با شکلهای گوناگون به‌طور مؤثری رایج شد. در حوالی سالهای ۱۸۸۵ شبکه‌های متعدد توزیع، فعال شدند جریان برق عموماً بوسیلهٔ آلترناتوری مستقیماً با ۲۵۰۰ ولت تولید می‌شد و ترانسفورماتورها برای پایین آوردن ولتاژ به‌کار گرفته می‌شدند.

۱. Zipernowsky، کارولی (۱۸۵۳ ـ ۱۹۴۲): مهندس مجارستانی برق.

2. Max Déri 3. Otto Titus Blathy 4. Dick 5. Kennedy



شکل ۵۷. مقطع افقی ترانسفورماتور دیک ـ کندی.
هسته به‌شکل I است، مانند القاگیر ماکویی زیمنس. سیم CD که در داخل پیچیده شده‌است، مدار القاگیر را تشکیل می‌دهد؛ سیم‌پیچی AB، مدار القاگر است. یک سیم‌پیچی دایره‌ای از آهن ستبر، مدار مغناطیس را کامل می‌کند.

احتمالاً برای نخستین بار بمناسبت نمایش بزرگ تاریخی سال ۱۸۹۱ بود که در پست مبدأ، ولتاژ را بالا (۸۵۰۰) بردند سپس در پشت مقصد آن را پایین آوردند. اما در آن هنگام دستکاری جریان سه‌فازی مطرح بود. در آن زمان از جمع کردن سه ستون تک‌فاز، که تا آن موقع به‌کار گرفته می‌شدند، در یک دستگاه برای تشکیل یک ترانسفورماتور سه‌فاز آگاهی داشتند. انواع متعددی تقریباً در یک زمان بوسیله سازندگان مختلف به آزمایش آورده شدند. شرکت وستینگهاوس این سه ستون را در یک خط قرار داد. در سال ۱۸۹۱ برای نمایشگاه فرانکفورت آنچه که به‌کار برده شدند تولید کارگاههای AEG اُرلیکون بودند. این دستگاهها دوفاز، و اتصال ستاره‌ای داشتند. روش غوطه‌ور کردن در روغن برای عایق‌سازی مطمئن در آن زمان رسم شده بود.

این تکمیل پایانی به مکانیسینی غیرحرفه‌ای به نام جان نسبت داده می‌شود، که در سال ۱۸۵۴ یک بوبین القایی را در تربانتین داغ فرو برد. سازندگان سالهای ۹۰ همهٔ این روشها را با استفاده از روغن معدنی به‌کار می‌بردند. ترانسفورماتورها، که بخوبی خشک شده بودند در تشتی پر از روغن جوشان قرار داده می‌شدند. روغن را باز هم در تشت می‌جوشانیدند تا آخرین حباب هوای محبوس در آن خارج شود.

در ادامهٔ این تحولات و حدود یک ربع سده، تکنیکهای ساخت ترانسفورماتورهای استاتیک

تحول چندانی نداشتند. سیمهای قرقره‌ها را با چندین لایه نخ پیچیده شده روی آنها، عایق می‌کردند. قرقره‌ها را به‌شکل کلوچه‌ای می‌ساختند آنها را در روغنهای عایق فرو می‌بردند و دور هسته‌ها، به‌ترتیب یک در میان ولتاژ بالا و پایین، می‌چیدند. خود این هسته‌ها با فراورده‌های میکایی عایق می‌شدند. این فراورده‌ها در صنعت به شکلهای گوناگون برای کاربردهای مختلف ساخته می‌شدند. برش ورقهای هسته‌ها طوری انجام می‌گرفت تا جریان هوای خنک‌کننده در موردی که ترانسفورماتورها در روغن غوطه‌ور نیستند تأمین شده باشد. ساختمان این دستگاهها چنین بود؛ دستگاههایی که بعداً انتقال برق با فشار ۱۵، ۲۰ و حتی ۲۶ هزار ولت را تأمین کردند و با ابعاد بزرگی ساخته می‌شدند.

نمایشگاه لائوفن ـ فرانکفورت: نمایشگاه سال ۱۸۹۱ در انحصار پیروزی همهٔ پژوهشهایی بود که تنها در چند سال به تولید جریان چند فازی انجامیدند. تا آن زمان انتقال برق، مربوط به جریان مستقیم و برای روشن‌سازی بود و موتورها با دیره، یا با جریان متناوب ساده برای روشن‌سازی، تنها باگولار. آنچه در سال ۱۸۹۱ اتفاق افتاد چهره‌ای تازه داشت: یک جریان متناوب چند فازی، که هم روشن‌سازی و هم توزیع نیروی محرکه را تأمین می‌کرد.

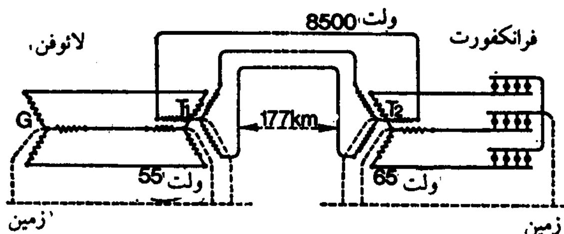
چنین نمایشی در فرصت نمایشگاه جهانی برق فرانکفورت کنار ماین اتفاق افتاد، ـ نمایشی که بویژه با ارائه فراورده‌های آلمان و سویس، مولدها و موتورهای دو یا سه فازی درخشید. این نمایشگاه تنها بدلیل بالا، نسبت به نمایشگاههای سالهای گذشته، تازگی داشته است. اما افزون بر آن، گروهی از مهندسان با همکاری چندین مؤسسه و ادارات دولتی، برقراری یک خط انتقال برق به طول ۱۷۷ کیلومتر، فاصله میان لائوفن کنار رودخانهٔ نکار[1] و محل نمایشگاه در فرانکفورت را تأمین کردند. ابتکار این اقدام با آقای اوسکار فون میلر[2] بود که بعدها *Deutsches Museum* مونیخ را تأسیس کرد و نیز در سال ۱۸۹۰ مأمور ایجاد یک کارخانهٔ برق در لائوفن برای روشن‌سازی شهر مجاور، هایلبرون[3] شد. این طرح دقیقاً شامل تغذیه و روشن‌سازی شهر با جریان سه‌فاز بود. آنان فکر می‌کردند که بتوانند از وسایل فنی موجود، برای استفاده از انتقال برق با فشار قوی بوسیلهٔ جریان سه‌فاز به مسافت زیاد، بزرگترین کشف تا آن روزگار ـ و نیز از موتورهای با میدان گردان بهره گیرند (شکل ۵۸).

---

۱. Neckar: رودخانه‌ای در غرب آلمان به طول ۲۲۸ کیلومتر، از جنگلهای سیاه سرچشمه می‌گیرد و در ماینهایم به راین می‌پیوندد. ـ م.

2. Oscar von Miller

۳. Heilbronn: ناحیه‌ای در بادن ـ وورتمبرک، کنار رودخانهٔ نکار، آلمان. ـ م.



شکل ۵۸. نمایهٔ آزمایش انتقال برق سه‌فاز (۱۸۹۱).
G: مولد؛ T_1: ترانسفورماتوری که ولتاژ را تا ۸۵۰۰ ولت بالا برده است؛ T_2: ترانسفورماتوری که ولتاژ را تا ولتاژ کاری ۶۵ ولت پایین آورده است. تنها شبکه روشن‌سازی با موتور دینامی نشان داده است. موتور سه فاز، در شکل دیده نمی‌شود.

هر دو مولد را اُرلیکون ساخت و طرح آن از آقای براون بود. ترانسفورماتورها، همان‌طورکه دیدیم، به‌ترتیب ساخته اُرلیکون و AEG، موتور از دالیوو- دابراوولسکی بود که در AEG ساخته شده بود. سرانجام در خط کردن آن با سیم مسی، که صنعتگری آن را آماده کرده بود، بوسیله سرویسهای پستی چهار دولت آلمان عملی شد. همه نمایشهای پیشین، چه کارهای دپره و چه کارهای گولار، در پرتو پشتیبانی مقامات دولتی یا نیمه‌دولتی انجام گرفته بود و این امر بخوبی نشان می‌دهد که تودهٔ مردم، محافل کارشناس و مقامات دولتی به پیشرفت صنعت برق علاقه داشتند. اما در نمایش لائوفن ـ فرانکفورت بخوبی روشن است که همکاری در این راه باز هم کاملتر شده‌بود. این نمایش، مثل نمایشهای پیشین، اقدامی برای متقاعد کردن تماشاییان و گشودن راه یک صنعت نوین نبود. این نمایش، نتیجهٔ نهایی پژوهشهای پایان پذیرفته شده، لااقل در این مرحله بود.

طبیعتاً سازندگان نتوانسته بودند آزمایشی را که مقدمات آن بخوبی چیده شده بود، کاملاً اداره کنند. به‌هنگام آماده‌سازی تا آغاز آزمایشها دلهره‌های متعددی احساس شد. سه سیم این خط را حدود ۳۰۰۰ دکل کوچک مسی نگهداشته بودند و تلفات انرژی در این دکلها معلوم نبود. ولتاژ انتقالی ۸۰۰۰ ولت ـ حداقل لازم برای داشتن ۶۰ اسب روی تلمبهٔ هیدرولیکی که با موتور کار می‌کرد ـ و تغذیهٔ ۱۰۰۰ لامپ روشنایی نیز ایجاد دلهره می‌کرد. عده‌ای از این می‌ترسیدند که بازده از ۵۰٪ پایینتر باشد که در چنین صورتی، آزمایش مورد داوری قرار نمی‌گرفت. اما در پایان، نتیجه کار موفقیت‌آمیز بود. بازده بین توربین لائوفن و تلمبهٔ فرانکفورت بین ۶۸/۵ تا ۲ و ۷۵٪ اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری جالبی برای کاربردهای آینده به‌عمل آمد. با افزودن ترانسفورماتور دوم، در هر سر خط، فشار تا ۲۸۰۰۰ ولت بالا رفت و توانستند ادعا کنند که در فرکانس ۲۴ دور، قدرت ۱۸۰ اسب با بازده ۷۵٪ انتقال یافته است.

گرچه نمایشگاه فرانکفورت همه مسایل انتقال جریان متناوب با فشار زیاد را حل نکرد، ثابت کرد که برای این نوع کاربردها، همهٔ شرایط فنی وجود دارد. در واقع این پیشرفت، گام‌به‌گام انجام گرفت و تنها پس از نخستین جنگ جهانی جهشهایی داشته است. در آغاز، پراتیک جریان مستقیم بر جریان متناوب برتری داشت، و ، تنها در این دوره است که انتقال انرژی به‌شکل برق رفته‌رفته به یک عامل لازم و مهم برای صنعت، روشن‌سازی و کشش روی ریلها تبدیل می‌شود.

۴

کاربردهای بی‌درنگ جریان برق

تاکنون به مناسبتهای گوناگون گفته‌ایم که پیلهای گالوانی برای طلاکاریهای صنعتی و نیز روشنایی با قوس برقی دو انگیزهٔ اولیه برای تولید جریان برق بودند و آنها در موفقیت دینامهای اولیه، نخستین گام در گسترش سریعی از تجهیزات الکتروتکنیکی، که مشکلات توزیع و مصرف را تغییر داد، تأثیر ویژه‌ای داشتند. باز باید به فرآیند توسعهٔ کاربرد برق صنعتی در ربع پایانی سدهٔ نوزدهم باز گردیم، در واقع بین گسترش مولدها و دورنماهای مصرف برق، نوعی روابط متقابل علت و معلول وجود داشته است که هرکس که بخواهد این مرحلهٔ نوآوری را بخوبی درک کند نمی‌تواند آن را نادیده گیرد. این مرحله در پایه‌گذاری ساختارهای تکنیکی، که تمدن صنعتی سدهٔ نوزدهم بر روی آنها بنا شد سهم بزرگی دارد.

انگیزه‌های مربوط به نیازمندیها و ساخت وسایل: سیمای این پدیده، یگانه نیست. دغدغهٔ مصرف و ساخت وسایل نوین تولیدی، در همهٔ این چرخه‌های تحول تکنیکی به‌چشم می‌خورد. اما این مناسبات غالباً به کندی انجام می‌گیرند. می‌توان با بررسی مراحل اختراع ماشین بخار پیستوندار اواخر سدهٔ هفدهم تا اوایل سدهٔ نوزدهم این ادعا را ثابت کرد. این دغدغه گاهی عامل اصلی اختراع

است و ماشینی شدن صنعت نساجی مثالی از این ادعاست. نیازمندیهایی که زاییدهٔ فشارهای اقتصادی جدید بودند با لختی زیاد به همت مخترعان وسایل فنی برآورده شدند. سرانجام، اینکه توان آفرینش و دامنهٔ کاربرد وسایل نیز غالباً افزایش کندی داشته‌اند و نوآوری بابطوء کمال یافته است. این خصلت در تکمیل موتورهای درونسوز دیده می‌شود. در این زمینهٔ گرایش به آفریدن، بسرعت خود را نشان داد اما طی نیم سده پیشرفت آن آهسته بود و در آخر، زمانی‌که توان اختراع پدیدار شد نیاز به کاربرد آن چندان زیاد نبود. موتورهای گازی صنعتی با تردید بسیار به‌کار گرفته شدند و تنها با گذشت نیم سده از ساخت نمونه‌های اولیه بود که این وسیله جدید به مرحلهٔ فعالی از کاربرد در همهٔ زمینه‌ها، گام نهاد.

اما الکترونیک صنعتی، برعکس، به‌علت اینکه نیازمندیهای کاربردی، به‌طور تقریباً پیوسته‌ای قدرت آفرینش را تحریک می‌کردند، بسرعت به پیش رفت و آهنگ پیشرفت به مدت حدود سی سال، شاید بتوان گفت بدون وقفه، حفظ شد. جالبتر اینکه نیازمندیهای بیان نشدند و احتمالاً پیش از آنکه امکان برآورده ساختن به‌وجود آید، نه احساس می‌شدند و نه بیان گردیدند. اما پس از پیدایش این امکانات، نیازمندیها یکباره سرریز شدند و بی‌درنگ نقش انگیزشی خود را ایفا کردند. وانگهی این نیازمندیها، همانند آنچه که در نیمهٔ دوم سدهٔ بیستم اتفاق افتاد (اتومبیل، تلویزیون و وسایل ساخته شده از مواد سنتزی) ساختگی و بیهوده نبودند، و این امر در اوضاع و احوالی بود که محیط تکنیکی پرورانندهٔ آنها در آن زمان سطح بالایی داشت.

در واقع برق صنعتی از همان آغاز پیدایش، انگیزهٔ ایجاد نوع تازه‌ای از اسکلت‌بندی تکنیکی شد که بعدها تمدن را به مرحلهٔ قطعی تحول تکنیکی وارد ساخت. گمان می‌رود که دست‌درکاران، از همان سالهای نخستین بدین امر آگاهی داشتند یا لااقل کسانی‌که می‌توان آنها را تکنسین یا اقتصاددان حرفه‌ای این جهش دانست.

وانگهی به‌طوری‌که دیده خواهد شد، شیمی صنعتی و نیز متالورژی از رشته‌های نخست مورد علاقهٔ مردم بودند، و روشن‌سازی و حمل‌ونقل دو صنعتی بودند که ردیفهای بلافاصله پس از آنها را اشغال می‌کردند.

روشن‌سازی با برق

داستان شمعهای یابلوچکوف: لامپهای قوسی، همان‌طورکه دیدیم، تنها برای روشناییهای استثنایی به‌کار می‌رفتند. شمعهای یابلوچکوف نخستین وسیلهٔ روشن‌سازی دائمی خیابانها و پارکهای ملی،

باغهای بزرگ، سوپرها، سالنهای ایستگاه، نمایشگاهها و سالنهای تئاتر بودند.

شمعهای یابلوچکوف از همان زمان پیدایش، اختراعی عالی ارزیابی شدند زیرا پیچیدگیهای مکانیکی رگولاتورهای آنها حذف شده بود. اما نواقص آنها پس از مدت کوتاهی آشکار شد. نخست، آنها می‌بایست با جریان متناوب تغذیه می‌شدند، و این در زمانی بود که تنها به جریان مستقیم توجه می‌شد. رگولاتورها با جریان مستقیم انطباق یافته بودند؛ زیرا آنها به‌طور مکانیکی اتلاف نابرابر دو میلهٔ زغالی را جبران می‌کردند. در شمعهای یابلوچکوف اتلاف دو میلهٔ زغالی باید برابر باشند، چون هیچ‌گونه جبرانی میسر نبود؛ بنابراین می‌بایست از جریان متناوب استفاده شود.

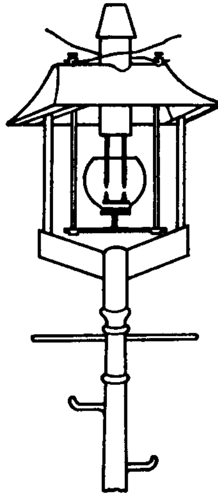
گفته شد که آقایان گرام و لونتن در چنین موقعیتی نخستین آلترناتورها را ساختند. اما،شبکه‌های توزیع محدودی مورد نظر بودند، و بعداً مسأله اقتصادی آنها مطرح شد. در سالهای ۸۰ و در آغاز ۱۸۸۹، که شبکه‌های توزیع برای شهر پاریس درحال پوشش سراسر این شهر بزرگ بودند و اکثراً این شبکه‌ها به یکدیگر متصل می‌شدند، شمعهای یابلوچکوف سریعاً از دور خارج شدند. آنها صرفاً به حادثه‌ای، نه بدون اهمیت، تبدیل شدند زیرا لااقل، مجوزی برای طرح روشن‌سازی سراسری با برق بودند. اما این ادیسن بود که با همهٔ فکر و جسم خود وارد این میدان شد.

تحول لامپهای قوسی: لامپهای قوسی حتی زمانی‌که لامپهای التهابی کنونی به‌وجود آمدن شبکه‌های سراسری توزیع را ممکن ساختند جای خود را در تجهیزات روشنایی عمومی نگاهداشتند. لامپهای قوسی، همچنین تحولی کاملاً مهم در دهه‌های نخستین کاربرد سیستماتیک خود داشتند.

ترتیبات گوناگونی برای این لامپها پیشنهاد شد و سرانجامهای مختلفی داشتند، ترتیباتی که حتی فهرست کردن آنها نیز ممکن نیست. در نمایشگاه برق سال ۱۸۸۲ انواع لامپهای قوسی به ۸۶ رسید. نوع بسیار رایجی از آنِ چارلز فرانسیس براش، ۱۸۷۸، بود که از آن سخن گفته‌ایم. در این نوع لامپ، زغال پایینی ثابت بود، اما زغال بالایی، براثر وزن خودش با مکانیسم بسیار پیچیده‌ای از ترمز و نوعی ناظم الکترومغناطیسی پایین می‌آمد (شکل ۵۹). لامپ براش، در هر سیستم تأسیسات برقی دارای مولد، و توزیعی شبیه گرام شرکت داشت. لامپ سولی[1] (خورشیدی)، ۱۸۸۰ معاصران خود را خیره می‌کرد. دو میلهٔ کربنی در میان یک قطعهٔ آهکی به‌سوی یکدیگر خم شده بودند و نور تند طلایی رنگی ایجاد می‌کردند و از این لحاظ، خورشیدی نام گرفتند (شکل ۶۰). برپایه قضاوتی در همان دوره، لامپ خورشیدی همه نواقص شمع یابلوچکوف، پیش‌نمونه خود را، با خود داشت، اما مدتها در کار بود.

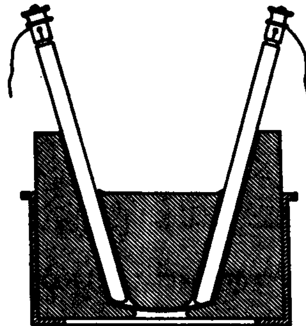
ساخت میله‌های زغالی، که گاهی آن را مدار ولتا یا مدار روشن می‌نامیدند، با روشهای گوناگونی

1. Soleil



شکل ۵۹.لامپ براش؛ برای روشن‌سازی شهر نیویورک (۱۸۷۸).

انجام می‌گرفت. تراش زغال قرع، کار نسبتاً پرهزینه‌ای بود و بزودی بین سالهای ۱۸۷۵ ـ ۱۸۸۰ چندین دستور برای تهیهٔ نوعی خمیر زغالی دارای قوام مناسب که هم با تراشیدن و هم در اثر روزنرانی شکل می‌گرفتند، پیشنهاد شد. روش اخیر را آقای فردینان کاره[1] در سال ۱۸۷۶ به نام خود به ثبت رسانید و برادر وی ادمون آن را به‌کار گرفت. ترکیب، و نیز طرز روزنرانی[2] این مخلوط،



شکل ۶۰.لامپ خورشیدی (۱۸۸۰).

1. F.Carré 2. extrusion

پیوسته اصلاح می‌شد. سرعت روزنرانی این میله‌ها در سال ۱۸۹۰ به ۸ تا ۱۰ متر در دقیقه رسید، که گواهی بر مقدار مصرف زیاد این میله‌ها در آن زمان است. این میله‌ها برحسب نوع لامپها با قطرهای مختلف ساخته می‌شدند. مدت کار آنها هرگز از دو یا سه روز فراتر نمی‌رفت، درحالی‌که در این زمان از نیمه شب به‌بعد، خاموشی در شهر برقرار می‌شد. این عمر کوتاه، هزینه را بالا می‌برد. برای فلزی کردن سطح آن با روش گالوانوپلاستی کوشش می‌شد، هدف از این کار، بویژه رسانیدن جریان برق به نقطهٔ مشخصی از میله و نیز تنظیم شدت روشنایی لامپ بود؛ اما این کار، تنها با جریان متناوب رضایت‌بخش بود و در جریان مستقیم، بهتر بود که از الکترود فلزپوش تنها برای قطب مثبت استفاده شود.

با تحقیقی که بانو ایرتون در ۱۸۹۵ انجام داد از طرز کار قوسها اطلاعات دقیقی به‌دست آمد. شدت روشنایی نمونه‌های رایج از ۱۵۰ تا ۴۲۵ شمع اعشاری تفاوت می‌کرد. در استاندارد بین‌المللی، هر شمع اعشاری را برابر ۰٫۱۰۴ کارسل carcel در فرانسه، ۱٫۱۲ هفنر در آلمان و ۰٫۹۸ شمع در انگلستان تثبیت کردند. در همین بررسیها معلوم شد که شدت جذب شده بین ۵ و ۱۰ آمپر در ولتاژهای ۴۰ تا ۴۵ ولت تغییر می‌کند. بازده درخشانی از ۸ تا 12lm بر وات تغییر می‌کرد. افت ولتاژ در الکترود مثبت، ۴٫۵ بود و بقیه اصولاً مربوط به قوس می‌شد و الکترود منفی تنها چند ولت تأثیر داشت.

کمی پس از آن، میله‌های «فتیله‌ای» ساخته شد که مغز آن خمیری از سیلیکات و دودهٔ چراغ بود. این مغز را با خمیری از زغال، پیش از پخت آن، می‌پوشانیدند. در واقع نشان می‌دادند که درخشندگی، بیشتر مربوط به الکترودها و اصولاً از آند است، نه از خود قوس؛ و از اینجا بود که به بخارهای متعلق به مواد غیرزغالی توجه شد. بخارهای پتاسیم امکان می‌دادند تا قوس با فشاری کمتر، مثلاً ۴۵ ولت با فاصله‌ای کمتر، ۳ تا ۵ میلیمتر، حفظ شود. این بخارها، نوری رنگین و گرمتر ایجاد می‌کردند.

قوسهای لامپی: این مفاهیم با پیدایش قوسهای بین الکترودهای فلزی درون محفظه‌های بسته مشخص شدند. در این محفظه‌ها فلزهای تبخیر شده از نظر درخشندگی لامپها و رنگ نور، نقش مهمی داشتند.

در سال ۱۸۴۶ آقای استیت اندیشهٔ محبوس کردن زغالهای لامپ در ظرف سربسته را ابراز داشته بود؛ این اندیشه مقدار سوخت را کاهش می‌داد و فرسایش میله را به ۲۵ میلیمتر در ساعت پایین می‌آورد. در سال ۱۸۹۷ آقای مارکس[1] محفظه دربسته‌ای را به نمایش گذاشت که شماری

1. Marks

از نواقص ذاتی سیستم در آن برطرف شده بود که از آن میان می‌توان از رسوب ذرات زغال روی سطح داخلی محفظه نام برد که همچون ورق نازک سیاهی از درخشش دستگاه می‌کاست. این سیاهی با بالا بردن ولتاژ تا ۸۰ و امکان دخول کم هوا در محفظه ـ کاری که سوخت کاملتر زغالها را تأمین می‌کند ـ برطرف شد. قوس برقی دیگر به سر میله (مداد روشن) نمی‌چسبید، درحالی‌که در بیشتر انواع لامپها، این‌طور بود؛ بلکه به تناسب سوخت، دور میله می‌گردید و جنب آن قرار داشت. عمر محفظه‌های دربسته به صد تا دویست ساعت رسید، درحالی‌که عمر آنها در گذشته ۱۲ تا ۱۸ ساعت بود. این امر، پیشرفت مهمی به‌شمار آمد.

لامپهای دارای الکترودهای زغالی نمکسود در سالهای ۱۹۰۵ ـ ۱۹۱۰ بیشترین کاربرد را داشتند. در آن دوران لامپهای کوچک با میله‌های نازک در اغلب جاها دیده می‌شد. مصرف آنها ۱ تا ۳ آمپر بود و نوری بنفش‌فام می‌دادند و هر شمع بیش از یک وات مصرف نداشت و لامپهای دارای توان زیاد ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ واتی که زغالهای آنها به شکل V بود قوس آنها کمی به بالا تمایل داشت. چگالی زیاد جریان مثلاً در لامپ کربن[1] بازده را بالا می‌برد. دوام کاری این نوع لامپها، بدون شارژ مجدد آنها، به ۵۰ ساعت رسید.

وسایل دیگری نیز تحقیق شدند. آقای بلوندل در ۱۹۰۵ لامپهای «هولوفان»[2] را ساخت که شیشهٔ مخطط آنها بهترین انتشار افقی نور را، با وجود یک جذب ۱۰٪ بالاتر از شار نوری، تأمین می‌کرد.

جاودانگی لامپهای قوسی: قوسهای برقی با وجود رقابت لامپهای التهابی، حتی در روزگار ما هم، در کار هستند. آنها ویژهٔ تجهیزات چراغهای دریایی هستنُد و از همان آغاز کار سینما برای آپاراتهای آن و از بدو جنگ جهانی اول برای نورافکنهای دفاع ضدهوایی و بالاخره از سالهای ۱۹۲۰ در استودیوهای فیلمبرداری در رقابت تنگاتنگ با لامپهای التهابی به‌کار گرفته شدند. اما قوس در همه این کاربردها به‌عنوان یک منبع نوری می‌بایست با وسایل اپتیکی خاصی احاطه شده باشد که اصل آن به‌طورکلی بر کاربرد عدسی با مقیاس فرنل قرار دارد.

با این‌همه، بهتر شدن درخشندگی طی دهه‌های نخست سده بیستم انجام گرفت و آن در پرتو پیشرفت تکنیکهایی بود که بر کاربرد عاقلانه الکترودهای فلزی با ترکیبهای جدید تکیه داشتند. فرو ـ تیتان را در آغاز به‌جای زغال به‌کار بردند. بهترین بازده‌ها از آن لامپهایی بود که با ولتاژ ۴۸ تا ۵۵ ولت و شدت ۳/۵ تا ۵ آمپر کار می‌کردند. اما این لامپها عیب مزاحمی داشتند و آن تشکیل کاربید تیتان، ماده‌ای عایق، در سر الکترودها بود. برای اشتعال لازم بود وسیلهٔ خاصی ابداع کنند،

1. lampe Carbone 2. Holophane

اما نتیجهٔ خوبی نداد.

در دنبالهٔ این کار، ناگزیر به خلق ماده‌ای رسیدند که در اثر تخلیهٔ برقی بسیار متفاوت روشن می‌شد. تجربیات نشان دادند که در قوسهای بین فلزات، تنها سطح کوچکی از الکترودها تابنده می‌شوند و تأثیر الکترودها در تابندگی لامپ، زیاد نیست. به پدیدهٔ تازه‌ای برخورد کرده بودند، که در واقع عبارت بود از بخارهای فلزی که خود قوس را تشکیل می‌داد و درخشش را سبب می‌شد. ترکیب هوشمندانه‌ای در سال ۱۹۰۳ اساساً بوسیلهٔ کوپر ـ هیویت[1] به آزمایش گذارده شد. این ترکیب لوله‌ای بود که آن را تخلیه کرده بودند و الکترود بالایی آن از زغال بود. الکترود پایینی، از نعلبکی گودی محتوی جیوه تشکیل می‌شد. بخار جیوه که در اثر نشر کاتدی یونیده می‌شد قوس را پدید می‌آورد. شعلهٔ پایداری به‌دست می‌آمد، اما این شعله فاقد پرتوهای قرمز بود، که روی منابع نوری دیگر تلألو داشت. لامپ آقای کوپر ـ هیوویت را می‌توان نخستین لامپ تخلیه‌ای دانست که با جریان متناوب کار می‌کرد.

آقای هریوس کوش[2] با تعویض لوله‌های شیشه‌ای با لوله‌های کوارتزی به دماهای پنج تا شش هزار صدبخشی در بخار دست یافت و لامپهای بسیار قوی از ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ شمع با ولتاژ ۲۲۰ برای روشن‌سازی فضاهای بزرگ ساخت. بعدها لامپهایی از شیشه ویژه ساختند که نور بنفش و ماورای آن را که از قوس ساطع می‌شد جذب می‌کرد.

در همین زمان بود که ترکیبی از بخار جیوه و لامپهای ملتهب برای روشن‌سازی کارگاهها پیشنهاد شد که ۳۰۰ تا ۵۰۰ شمع نور داشت، این ترکیب با دخالت دادن تابشهای قرمز در نور بخار جیوه که سبزفامی آن دلچسب نبود طرفداران زیادی یافت. بعدها، از سال ۱۹۳۰ بخار جیوه همراه بخار سدیم در لامپهای تخلیه‌ای برای بعضی روشناییهای خارجی به‌کار گرفته شدند؛ این روش هنوز هم دستخوش تحولاتی است.

لامپهای با تخلیهٔ برقی: روش تخلیهٔ برقی در گازها، که آقای گایسلر[3] آن را در حدود سال ۱۸۵۸ با ساخت لوله‌ای با هوای بسیار کم برای این تجربیات پایه گذارده بود، بنوبهٔ خود رواج یافت. تکامل آهستهٔ امکانات فنی، بویژه در زمینهٔ ساختار و شکل الکترودها و، از آغاز سدهٔ بیستم، در دسترس بودن گازهای کمیاب جوّ، امکان ساخت وسایلی برای روشن‌سازی را فراهم آوردند که از سالهای ۱۹۳۰ به بعد اهمیت فراوان یافتند. آقای مور[4] در سال ۱۸۹۶ از تابشهایی استفاده کرد که ویژهٔ گازها در یک لولهٔ ازت بود که نور زرد طلایی بیرون می‌داد و نیز لوله‌ای حاوی گازکربنیک با نور سفید. بعدها کاربرد یکی از گازهای کمیاب یا مخلوطی از دو نوع از این گازها، پیدایش گام طویلی

1. Cooper-Hewitt 2. Heraeus Küch 3. Geissler 4. Moore

از رنگهای نوری را میسر ساخت. کاربرد بخارهای فلزی نیز سهولتهای پرارزشی را از لحاظ فنی در طرز کار این لامپها افزود.

سرانجام کاربرد آثار فلوئورسانی نیز زمینهٔ کاربرد لوله‌های تخلیه‌ای را گسترده‌تر ساخت. آقای ادمون بکرل در سال ۱۸۵۹ ثابت کرده بود که برخی ترکیبات معدنی، مخلوطهای گوگردی قلیاییهای خاکی و سولفور روی، در لولهٔ گایسلر نوعی نور فلوئورسانی ایجاد می‌کنند که سراسر طیف نور مرئی را می‌پوشاند. این پدیده‌ها تا مدتها تنها موضوع پژوهشهای آزمایشگاهی بودند. طی سالهای ۱۹۳۰ بود که آقای ژرژ کلود[1] نخستین لوله‌های تخلیه‌ای با کاتد گرم را ساخت که دیوارهٔ درونی آنها با مواد فلوئورسانی پوشیده شده بود و در آنها یکی از گازهای کمیاب و بخار جیوه را وارد کرده بودند. این لوله‌ها در فشار زیاد کار می‌کردند و برای روشن شدن می‌بایست چندین متر طول داشته باشند. از سال ۱۹۳۵ به‌طور روزافزونی آنها را، نخست بمنظور تزئین نوری به‌کار گرفتند، بویژه در سال ۱۹۳۷ برای تزئین برج ایفل؛ سپس برای روشنایی سالنهای بزرگ اجتماعات و گردهماییها از آنها استفاده می‌شد.

در جریان جنگ جهانی دوم، لامپهای فلوئورسانی، که با کاتد سرد شهرت یافته بودند و در آنها صدور یونی درکاتد ایجاد نمی‌شد در ممالک متحدهٔ امریکا به‌کار رفتند. این لامپها که با ولتاژ پایین کار می‌کنند در روزگار ما برای روشنایی محلهای سکونت و کار، به گستردگی به‌کار گرفته می‌شوند. آنها پس از جنگ جهانی دوم، بسرعت در همهٔ کشورها راه یافتند و تکنیک ساخت و کاربرد آنها پیوسته دستخوش تحول بوده است.

گامهایی در ساخت لامپهای فروزنده: از سال ۱۸۸۰ لامپهای دارای افروزه‌های ملتهب، روشنایی خانه‌ها را با الکتریسیته تأمین می‌کنند. پس از دستیابی به مرحله‌ای از تکامل متوجه شدند که لامپهای قوسی، در اثر فروزندگی سرهای الکترود یا بخارهای فلزی روشن می‌شوند. در مرحله‌ای از پژوهش، بین سالهای ۱۸۷۷ ـ ۱۸۸۰، مخترعان چندی کوشیدند تا از به‌اصطلاح اثر ژول برای ایجاد فروزندگی در الکترودهای کربنی استفاده کنند ـ کاری که لامپهای قوسی را تداعی می‌کند. این لامپها از نوع فروزنده با هوای آزاد بودند، سیستمی که میلهٔ زغالی را متناسب با مقدار سوخت آن جلو می‌برد تا کنتاکت آن را با قطعه یا دیسکی از زغال حفظ کند، از لامپ قوسی گرفته شده بود. دو مخترع تقریباً همزمان یک ابتکار را پیشنهاد کردند: امیل رنیه[2] از فرانسه و ریچارد وردرمان[3] از انگلستان، انواع لامپهایی که آنها دستور ساختنشان را داده بودند بسیار پیچیده بودند. کمپانی یابلوچکوف پس از اینکه سه یا چهار سال از خرید اختراعات آنها گذشته بود کوشید تا از

1. G.Claude 2. E. Reynier 3. R. Werdermann

این سیستم بویژه در لندن بهره گیرد. انواع دیگری در همان دوران در اروپا و ممالک متحدهٔ امریکا وجود داشتند اما موفقیت لامپ سوان ـ ادیسن آنها را بزودی از مصرف خارج ساخت.

در واقع ردیفی طولانی از کارهای گوناگون که از سال ۱۸۴۱ آغاز شده بود و به اختراع لامپ ادیسن پایان پذیرفت و جملگی برپایهٔ بهره‌گیری از اثر ژول روی افروزه‌ای بودند که جریان برق از آن می‌گذشت و آن را درخشان می‌کرد با کارهای فردریک مالیین[1] انگلیسی آغاز شده بود. افروزهٔ آن نخست طبعاً از پلاتین بود. گرچه بدین‌ترتیب از یک واکنش احتراق پرهیز شده بود اما با مشکل ذوب شدن پلاتین روبه‌رو شدند که کمی از دمای لازم برای گرمای سفید پلاتین بالاتر بود. مسألهٔ بسیار ظریف، همانا اتصال افروزهٔ درخشان به سرهای اتصالات بیرونی بود.

چنین می‌نماید که پس از مدت بسیار اندکی به اندیشه استفاده از افروزهٔ کربنی در محفظه‌ای تخلیه شده از هوا دست یافتند. کارهای نخستین در این راه شکل قصه را دارد. قدیمترین آنها با نام به‌اصطلاح مخترعی امریکایی: ج. و. استار[2] و هموطن وی کینگ[3] که می‌توان وی را تا حدودی قربانی این راه نامید، همراه است. آقای کینگ در واقع به سال ۱۸۴۵ این اختراع را به ثبت رسانیده بود. آقای استار در همان سال به کمک و همراهی شخصی انساندوست به لندن رفته بود و در آنجا اختراع خود را به نمایش گذارد. وی آویزی ساخته بود که ۲۶ لامپ را حمل می‌کرد و این عدد همان تعداد ایالتهایی بود که ممالک متحده را تشکیل می‌دادند. آقای فاراده در این نمایش که با استقبال زیادی روبه‌رو شد حضور داشت. گویا این استقبال بیشتر انگیزه کنجکاوی داشته است تا نتایج رضایت‌بخش. این لامپ کربنی که چیزی بیش از یک قوس برقی که با آن آزمایشهایی انجام می‌دادند نبود، هنوز در مرحله‌ای نبود که بتواند در مشکل روشن‌سازی تحولی ایجاد کند.

برای حل مشکل روشن‌سازی دو مانع باید برطرف می‌شدند. نخست باید نوعی افروزهٔ کربنی مناسب این کار ساخته می‌شد. کربن به‌عنوان یک ماده، بهترین خواص مناسب این کار را داشت. اواخر این سده بود که معلومات علمی دربارهٔ این ماده به‌دست آمد. نخستین انتخاب، بدین‌ترتیب، نتیجهٔ بررسیهای تجربی بود. بعدها این انتخاب به‌طور طبیعی از سوی سازندگان لامپهای افروزه‌ای سوان و ادیسن تجدید شد. اما طی سالهای ۴۰ و چند دهه پس از آن نیز تنها روش شناخته شده برای تهیهٔ افروزهٔ کربنی، تراش هرچه ظریفتر زغال قرع بود.

مانع دوم، ناتوانی وسایل موجود برای خلأسازی بود. تلمبه‌های مکانیکی امکان پیش بردن خلأ را تا آنجا که از سوخته شدن و فروپاشی زغال پرهیز شود، نداشتند. دوام میله‌های کربنی بسیار کم بود و لامپهای شیشه‌ای بسرعت سیاه می‌شدند.

1. F. Maleyne 2. J. W. Starr 3. King

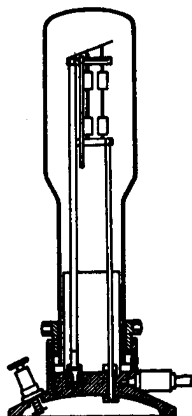
اما این کوششها ادامه یافت. آقایان انگلیسی گرینر[1] و استیت در سال ۱۸۴۶ افروزهٔ کربنی را با تیزاب سلطانی (اسید نیتریک + اسیدکلریدریک) عمل آوردند تا آن را خالص گردانند. پژوهشگران دیگری نظیر آقای پتری[2] در سال ۱۸۴۹ از نو، فلزات بویژه ایریدیم و آلیاژهای آن را به‌کار گرفتند؛ آقای شانژی[3] نیز در ۱۸۵۹ از پلاتین استفاده کرد، اما موفقیتی به‌دست نیاورد. آقای جوزف و. سوان شیمیدان انگلیسی به مدت دوازده سال با پلاتین و مقوایی که آن را زغال کرده و در لوله‌ای شیشه‌ای بین دو قطعه زغال گذاشته بود کارکرد و لامپ را از هوا تخلیه می‌کرد. وی با این آزمایشها توانست با گذرانیدن برق از افروزه، گرچه بسرعت متلاشی شد، آن را سرخ کند. سوان در سال ۱۸۶۰ تحقیقات خود را رها کرد.

آقای آلکساندر لودیگین[4] فیزیکدان روس با ساختن نوعی لامپ زغالی در سال ۱۸۷۳ جایزهٔ آکادمی علوم سن پترزبورگ را برد. این لامپ را غالباً به‌عنوان نخستین نمونهٔ لامپهای فروزنده ذکر می‌کنند. در حقیقت باید گفت که آقای لودیگین و به کارگیران لامپ وی که نمونهٔ نخستین آن را، برای اینکه مورد استفاده قرارگیرد، اصلاح کردند هیچ‌یک از مشکلات مربوط به لامپهای پیشین را برطرف نساختند. آنان فقط توانستند لامپهای پیشین را با مهارت دستکاری کنند. این لامپ چند میلهٔ زغالی داشت که با مصرف یکی، میلهٔ دیگری وارد مدار تغذیه می‌شد و زمانی‌که آخرین میله مصرف می‌شد میله‌ای از مس مدار را بسته نگاه می‌داشت تا لامپ بعدی روشن شود (شکل ۶۱). تنها مزیت این سیستم امکان جدا کردن لامپ و تجدید کارایی آن با تعدادی زغالهای تازه بود. در بعضی از مدلها هوای لامپ را تخلیه می‌کردند اما میلهٔ زغالی به‌علت طرز نصب آن فرو می‌پاشید؛ از خلأکردن بعضی هم صرفنظر شده بود و تنها به هواناپذیری شدید آنها اکتفا می‌شد، بدین امید که اکسیژن محبوس در لامپ، عمر کوتاهتر از میلهٔ زغالی دارد. بهای تمام شدهٔ این لامپها بسیار بالا بود و طی چند سال تنها نقش تفنی داشتند.

اندیشه جالبی از سوی آقای ویلیام ا. ساویر[5] امریکایی ابراز گردید که پس از گذشت چندین سال بوسیلهٔ آقایان اروینگ لنگمیور و ژرژ کلود دنبال شد. آقای ساویر پیشنهاد کرده بود که افروزهٔ زغالی را در محیطی از یک گاز خنثی ـ مثلاً نیتروژن ـ قرار دهند، نه اینکه هوای آن را به‌طور ناقص خالی کنند. ساویر در فهرست الکتریسینهای امریکایی که همزمان با ادیسن برای حل معجزه‌آسای روشن‌سازی با لامپهای فروزنده کوشیده‌اند، جای دارد.

شخصیت ادیسن: آقای ادیسن در سال ۱۸۷۷ با اختراع یابلوچکوف به تفصیل آشنا شد و در سال بعد، کارهای روشن‌سازی خیابان اپرای پاریس، به مناسبت سومین نمایشگاه عمومی فرانسه،

1. Greener 2. Petrie 3. Changy 4. A. Lodyguine 5. W. Sawyer



شکل ۶۱. لامپ لودیگین.
میله‌های زغالی با طولهای نابرابر، میان دو بشقابک بالا گذاشته شده‌اند میله‌ای مسین، موازی آنها، زمانی‌که آخرین میلهٔ زغالی مصرف شده است، مدار را بسته نگاه می‌دارد. در این لامپها خلأ کردن به‌طور ناقص انجام گرفته است.

در ممالک متحدهٔ امریکا با تحسینهای فراوان روبه‌رو شد. مطلبی که ذهن پژوهشگران امریکایی را به خود مشغول می‌داشت ظاهراً این بود که مشکل نوع تازهٔ روشن‌سازی، تنها با کاربرد لامپی که با مهارت طراحی شده باشد حل نمی‌شود؛ بلکه حل آن درگرو حل سیستم تولید و توزیع برق است.

در این دوران در امریکا دینام هنوز، مانند کاربرد لامپ قوسی، پدیدهٔ تازه‌ای بود. نخستین دینام را در امریکا آقایان م. فارمر[1] و ویلیام والاس ساختند. فارمر برای خیابانها، کارگاهها و انبارها چندین تأسیسات روشنایی با لامپهای قوسی ایجاد کرده بود. مبتکر دیگری در این زمینه آقای چارلز ف. براش بود. ادیسن هنوز توجهی به این مسائل نداشت و اختراعات متعدد دیگری، در آن زمان، ذهن او را مشغول داشته بودند. آخرین اختراعاتی که وی را بلندآوازه کرده بودند، در سال ۱۸۷۷ میکروفون زغالی بود که همراه آقای بل آن را اندیشیده بود و در اواخر همان سال نیز اختراع گراموفون دارای سیلندر و دیافراگم، با کمکهای فکری همکارش آقای جان کروزی[2] انجام گرفت.

در آن زمان، در نیوجرسی آقای ادیسن را جادوگر منلوپارک[3] می‌نامیدند؛ زیرا در آنجا وی در

۱. Moses Farmer (۱۸۲۰ـ۱۸۹۳): مخترع امریکایی، متولد بوسکاون.ـم.
۲. J. Kruesi (۱۸۴۳ـ۱۸۹۹): مهندس مکانیک متولد اشپایکر در سویس، که بعدها (۱۸۷۵) به امریکا رفت.ـم.
3. Menlo-Park

سال ۱۸۷۶ نخستین کارگاه پژوهشی بسیار محقر خود را برپا ساخته بود. وی در این کارگاه، که پیوسته بزرگتر می‌شد و در آغاز برای تحقیق دربارهٔ سیستم روشن‌سازی با برق ساخته شده بود، گروه روزافزونی از همکاران علمی و فنی خود را گرد آورد. ادیسن، شخصی خودآموخته بود و زمانی‌که کار را شروع کرد، به‌هنگام تحقیقاتش همراه با گراهام بل، در رشته برق، که پایگاهی علمی داشت احساس کرد که نیاز به اشخاصی صلاحیتدارتر از خود دارد. ادیسن سرمایه‌ای در اختیار داشت و توانسته بود اعتماد بانکدارانی همچون مورگان را به‌دست آورد. این بانکداران سرمایهٔ لازم برای تأسیس شرکتهای صنعتی را گردآوری می‌کردند و شرکتهایی که سهام خود را به بانکها می‌فروختند و می‌توانستند حقوقهای خوبی به کارکنان خود بپردازند.

آقای تامسن الوا ادیسن برخلاف افسانهٔ بسیار شایع و اینکه خود در دامن زدن بدان بسیار می‌کوشید، هرگز یک دانشمند نبود. حتی می‌توان گفت که وی در سراسر عمر کاری خود، یک ضد دانشمند بوده است. شخصیت وی نمونهٔ مخترعان کاسب امریکایی آن زمان، نظیر وستینگهاوس، پولمن[1] و بعدها واترمن است که استعدادهای آنان در اوضاع و احوال رونق و گسترش سریع صنعت در دوران پس از جنگهای داخلی، شکوفا شد و امکان بلندپروازیهای زیادی برای آنها فراهم آمد. به برکت این جنگها یانکیها قدرت اداره و رهبری همه سرزمینهای ممالک متحده را بتدریج و به‌طور منظم به‌دست خود گرفتند.

نبوغ ادیسن، سرشتی عمیقاً پراگماتیستی داشت و همهٔ اندیشه‌های تازه‌ای را که بیان یا آزمایش شده اما در کشورهای دیگر از آنها استقبال نشده بود می‌ربود و بسرعت منافعی را که از آنها می‌توانست به‌دست آورد تشخیص می‌داد و درعین‌حال خود را اسیر دردسرهای روشهای اکید مسیرهای علمی و حرکت مستقیم به‌سوی هدف نمی‌کرد. هوش سرشارش وی را توانا می‌ساخت تا هستهٔ اساسی داده‌ها را مورد استفاده قرار دهد و کارهای همکاران خویش را در جهت ساختهای هوشمندانه و عملی سوق دهد. بنابراین، در قضیهٔ روشن‌سازی شهر با برق، آقای ادیسن بود که به فیزیکدانان خود اهمیت قانون اهم و استفاده‌ای که از آن می‌توان برد را توضیح داد و به آنها امکان داد که با ابزار علمی خویش به‌پیش بروند.

وی این روحیهٔ خطر کردن و نیز توانایی تشخیص مؤثر و سریع راه انجام دادن کارهایی را که کسان دیگری که بدون وسایل چشمگیری بودند و به‌نظرشان عملی نبود از اجداد خود به ارث برده بود. در زمانی‌که همهٔ کسانی که روحیهٔ وی را نداشتند از خطر کردن پرهیز داشتند، آقای ادیسن همین‌که مطمئن می‌شد که اطلاعاتش کافی است، بسرعت دست به‌کار می‌شد.

1. Pullmann

این روحیه گاهی غیرمنطقی است زیرا نمی‌خواهد زمان را برای کامل کردن اطلاعات خود پیش از شروع کار از دست بدهد. وی با آمادگی هوشمندانه برای رفع موانعی که در جریان کار با آنها برخورد می‌شد، با برخورداری از شامهٔ فوق‌العاده و توانایی وسیع کارش وسایل لازم را فراهم می‌ساخت. در این زمینه از نیروی فراوان خلاقیت بهره می‌گرفت. ادیسن همین‌که به شهرت دست یافت عطشی تمام ناشدنی برای کسب ثروت از خود نشان داد. وی بسیار سریع و با زبردستی فراوان روزنامه‌ها را به تمجید از شخصیت خود واداشت.

شاید دلیل این کار، صرفاً فرونشاندن خودخواهی نبود. وی می‌بایست تحسین و اعتماد مردم را جلب می‌کرد تا افزایش پیوسته پول را تأمین کرده باشد. به همین جهت بود که وی توانست تردیدها و هشدارهای سرمایه‌دارانی را که در جریان کارهایش دربارهٔ برق ابراز می‌شدند نادیده بگیرد و جنگی را که رقبایی از قبیل ساویر و نیز فروشندگان گازهای روشنایی، که در صورت موفقیت وی کار و کسب‌شان را از دست می‌دادند، علیه وی آغاز کرده بودند با پیروزی به پایان رساند. باز به همین جهت بود که در سال ۱۸۷۸ که جوانی سی‌ویکساله بود توانست بهترین دانشمندان زمان خود، نظیر جان هاپکینسون انگلیسی را برای بهره‌گیری از مشورتهای ثمربخش وی به همکاری با خود فراخواند.

توده‌های بزرگ مردم در اثر بذرهای اعتمادی که این مخترع جادوگر، که از موفقیتی به موفقیت دیگر دست می‌یافت، با دقت در دلشان کاشته بود با اشتیاق تمام مجادلات وی را دنبال می‌کردند و گروه‌گروه به دیدن روشن‌سازی با برق یا تراموایی که در منلو پارک برپا کرده بود می‌رفتند. وی از هیچ فرصتی برای نشان دادن تفاخرآمیز توجهی که به کوچکترین مسألهٔ مربوط به طرح یا اجرا داشت غفلت نمی‌کرد و دربارهٔ اجرا شدن همهٔ آزمایشها، همهٔ امکانات و به‌دست آوردن بهترین راه‌حل تعصب می‌ورزید.

مثلاً زمانی‌که لیف خیزران را برای تهیهٔ افروزهٔ کربنی لامپهای خود برگزید، در سال ۱۸۸۰ با تحمل هزینه‌ای گزاف، چندین نفر را مأمور تحقیق در همهٔ مکانهایی کرد که انواع گوناگون خیزران در آنها می‌روییدند تا مناسبترین خیزران برای این منظور را بیابند. فرستادگان وی بیش از یک سال امریکای مرکزی، سواحل آمازون، هندوچین، سیلان، هند، چین و ژاپن را درنوردیدند. بعضی از آنها شدیداً بیمار شدند و یکی در کوبا مرد. اما از همان آغاز این تجسسها، آقای و. هـ. مور در ژاپن، اعلام کرده بود که مناسبترین نوع خیزران را یافته است و ادیسن از آن آگاه شده بود. با این‌حال، وی اجازه داد که همهٔ افراد مأموریتهای خود را به انجام رسانند و علت این امر را شاید بتوان ارضای هوس

وی در انجام سفرهای فوق‌العاده‌ای از نوع سفرهایی دانست که ژول ورن آنها را شرح داده است؛ وی ستایشگر داستانهای تخیلی بود، اما البته انگیزهٔ آن حفظ آوازهٔ عظمت وی در مؤسساتش بوده است.

شخصیتی که وی از آن برخوردار شده بود نیز نوعی قدرت مطلق نسبت به همکارانش را ایجاد کرده بود.

ادیسن اشخاصی را برمی‌گزید که بتوانند کمبودهای دانشهای او را در همهٔ زمینه‌ها ـ شیمی، فیزیک، الکتریسیته و مکانیک ـ پر کنند و بویژه در جریان این قضیهٔ روشن‌سازی با برق که مدیریت آن چهار سال ۱۸۷۸ ـ ۱۸۸۲ به‌طول کشید این قدرت مطلق وی همزمان با کارگران ورزیده‌ای که آمده بودند تا در کارگاههایی که وی در منلو پارک برپا داشته بود کار کنند بسرعت افزایش یافت. وی بدین‌ترتیب سپاهی از اشخاص با صلاحیت در همهٔ زمینه‌ها داشت، سپاهی که می‌توانست به رگبار اندیشه‌های وی که پیاپی عرضه می‌شدند جامهٔ عمل بپوشد. اکثر این اشخاص زمانی طولانی به وی وفادار ماندند و از تب خلاقیت وی گذران می‌کردند.

گرچه تعدادی از آنان بعدها به ناگزیر حقوق ادیسن را در بعضی اختراعات مورد تردید قرار دادند (مثلاً آقای گوردون هندریکس[1] در مورد کینتوسکوپ)، اما همگی در زمان خود اذعان داشتند که نام آنها هرگز نمی‌تواند در زمانی‌که یک نوآوری هیجان‌آور ایجاد می‌شد، همردیف نام ادیسن باشد. آقای ادیسن، همه چیز بود و هرگز کسی را در افتخار لقب مخترع سهیم نمی‌کرد. شاید هر یک از اطرافیان وی فکر می‌کردند که سودشان در این است که نام و شخصیت این رئیس افسانه‌ای خود را خدشه‌دار نسازند.

آقای ادیسن هیچ‌گاه و برای هیچ‌یک از نوآوریها مبتکر و نخستین کس نبوده است، اما شخصیت وی آنچنان بود که وقتی هم در جای دوم قرار می‌گرفت و پیش از نفر اول نام خود را به ثبت می‌رسانید، اعتراضات بسرعت خفه می‌شدند وانگهی زمانی‌که وی لازم می‌دید کار دیگری را بخرد، یا با آن شرکتی تشکیل دهد (مثلاً شرکتی که سوان را در انگلستان حمایت می‌کرد) وسایل لازم را در اختیار داشت و هر یک از دو طرف سود خود را در این کار می‌دیدند.

حتی رفتارهای کودکانه‌اش را هم به سود وی منعکس می‌کردند. در سال ۱۸۸۷ وی دستور ساخت آزمایشگاه‌های جدیدی در وست اورنج[2] را صادر کرد. اهمیت این آزمایشگاه‌ها ده برابر بیشتر از آزمایشگاههای منلو پارک بود و در پایان نام: نشنال ادیسن لابوراتوری بر آنها گذارده می‌شد.

1. G. Hendricks

۲. West Orange: شهری در شمال‌شرقی نیوجرسی به فاصلهٔ ۵ کیلومتری شمال‌غربی نیوارک امریکا ـ م.

وی کمی بعد به آقای ادوارد بلین[1]، که از آزمایشگاه محقر خود راضی به‌نظر می‌رسید گفت که اگر آزمایشگاهی ده برابر بزرگتر داشت ده برابر بیشتر می‌توانست کار انجام دهد. مطبوعات نیز این اظهارات را باز با افتخار تکرار کردند.

یکی از نویسندگان شرح حال وی می‌نویسد: «تقدیس شخصیت» آقای ادیسن در سال ۱۹۰۴ هنگام نمایشگاه سن لویی به مناسبت بیست‌وپنجمین سالگرد ساخت لامپهای دارای افروزهٔ کربنی انجام گرفت. آقای ادیسن تا پایان زندگی در سال ۱۹۳۱ در نظر جهانیان، تجسم قدرت خلاقهٔ «دانشمندان» امریکا بود. هموطنان وی نسبت به این شخصیت که نماد پایه‌های سلطهٔ صنعتی و اقتصادی آنها بود حساسیت ویژه‌ای داشتند. خود ادیسن این چهره را با رضایت خاطر می‌پذیرفت. وی تقریباً همه شخصیتهای جهان صنعتی، علمی و سیاسی را طبق مقاوله‌نامه‌ای که بدقت تنظیم شده بود پذیرفته است و در پایان دیدارها در برابر همهٔ همکارانش که جمع شده بودند عکسی را که پیش از آمدن مهمان آماده شده بود به وی اهدا می‌کرد.

پیدایش سیستم ادیسن: آقای ادیسن پیش از اینکه دربارهٔ سیستم روشنایی شهری آقای گرام ـ یابلوچکوف اطلاعاتی دریافت کند دربارهٔ تعمیم احتمالی روشنایی با برق برای خانه‌ها اندیشیده بود، اما آن را هنوز در فهرست مسائل در دست اقدام وارد نکرده بود، این کار در پاییز ۱۸۷۸ به‌دنبال پافشاری آقای جرج ف بارکر، استاد علومی که از دوستان وی بود و نیز یک مشاور شرکت تلگراف وسترن یونیون که بعدها از پشتیبانان جدی او شد، در دستور کار وی قرار گرفت. او برای اینکه به اندیشه‌های خود جهت بدهد، به بررسی تأسیساتی پرداخت که والاس برای روشن‌سازی مفرغ‌ریزی خود با هشت لامپ قوسی ایجاد کرده بود. شکی نیست که در این دیدار بود که وی متوجه شد که برق باید مانند گاز به‌کار گرفته شود: در ابتدا از یک مرکز به توسط انشعابات و روشن‌سازی خانه‌ها بوسیلهٔ لامپهایی که شدت آنها بسیار کمتر از شدت قوسهاست.

در این طرح همه چیز بدیع بود: تقسیم جریان هرگز عملی نشده بود و مدت درازی بود که الکتریسینها متقاعد شده بودند که تقسیم آن امکان ندارد. آقای ایلایهو تامسن که یکی از مشهورترین افراد بود پس از دیدن منلو پارک، در آغاز سال ۱۸۸۰ ـ که طی آن ادیسن نمایشی از لامپهایی که بتازگی ساخته بود از نظر او گذرانید ـ معتقد شد که تحقق چنین سیستمی ممکن نیست، زیرا هزینهٔ آن بسیار بالاست و همهٔ مس جهان را مصرف می‌کند.

با این‌حال، ادیسن مدت چهار سال به‌طور پیگیر کار کرد تا ایستگاه مشهور پرل استریت در نیویورک در سپتامبر ۱۸۸۲ به‌کار افتاد. از همهٔ همکاران وی تنها او بود که توانست درک کند که

1. E. Belin

این لامپ کافی نیست اما برای تجارتی کردن الکتریسیته، می‌توان آن را همچون بخشی از یک سیستم کامل که از دینام شروع و به منبع نورانی پایان می‌گیرد دانست و باز او بود که با پشتکار عجیبی سیستم خود را تکه‌تکه برقرار کرد.

در واقع در اواخر سال ۱۸۷۸ ساختار لامپ به‌عنوان شروع واقعی همهٔ کار بود و افروزهٔ التهابی، تنها وسیله‌ای که به مقتضیات روشنایی خانه جواب مساعد می‌داد. بدین دلیل بود که ادیسن با ساخت لامپ افروزه‌ای، کار خود را شروع کرد. دقیقاً در همین زمان بود که جوزف سوان که کارهای خود را در سال ۱۸۶۰ رها کرده بود، از نو دست به‌کار شد.

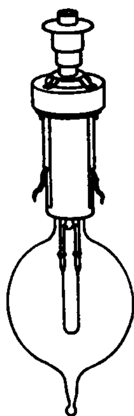
لامپ افروزه‌ای سوان: این همزمانی تصادفی نبود. این دو نفر که در آن زمان هیچ رابطه‌ای با یکدیگر نداشتند در واقع دستگاه جدیدی برای خلأ کردن داشتند که در اختیار پیشینیان آنان، و برای سوان در سالهای ۶۰ نبود. آقای هرمان اسپرنگل[1] آلمانی در سال ۱۸۶۵ دستگاهی ساخت که خلأ را در ظرف سربسته‌ای که فشار هوای آن کم بود به پیش می‌برد. وی برای این کار، هوای باقیمانده را با جریان دادن قطرات دانه تسبیحی جیوه در لولهٔ شیشه‌ای طویلی که قطر کمی داشت، بیرون می‌راند. شیپور جیوه‌ای اسپرنگل دسترسی به خلأیی در حدود چند میلیمتر جیوه، یعنی فشار بخار خود جیوه را ممکن ساخت.

این وسیله که در واقع مناسب کارهای آزمایشگاهی بود در آغاز زیاد به‌کار گرفته نمی‌شد اما زمانی‌که لازم شد که فیزیکدانان پدیدهٔ تخلیهٔ الکتریکی را در گازهای کم‌فشار بررسی کنند از آن استفاده کردند. این جریان تحقیقاتی از سال ۱۸۵۵ با آزمایشهای گایسلر آغاز شده بود، آقای هیتورف در ۱۸۶۵ آن را پی گرفت. کروکس دقیقاً در سال ۱۸۷۵ توانست با استفاده از لوله‌هایی که با به‌کار گرفتن دستگاه اسپرنگل خلأ زیادی ایجاد کرده بود شعاع کاتدی را آشکار سازد. این کشف هیجان‌انگیز شهرت این وسیله را به‌دنبال داشت.

آقای جوزف سوان که شیمیدان بود و روی نیتروژندار کردن سلولوزی کار می‌کرد پنبه را به‌عنوان مادهٔ مورد نظر برگزید. برای کربنی کردن پنبه، رشته‌های نازکی از آن را به شکل حلقه در بوته‌هایی پر از گرد زغال قرار داد. گرچه لامپ بقدر کافی از هوا تخلیه شده بود برای پایدار کردن رشتهٔ نخ، کارهای دیگری باید انجام می‌گرفت.

سوان اندیشید که رشتهٔ نخ را، زمانی‌که گازهای موجود در لامپ را تخلیه می‌کند، در لامپ، ملتهب سازد. این همان راه حلی بود که آقای ادیسن هم در همان زمان اندیشید. سرانجام، سوان دستکاری اولیهٔ رشته‌های نخ را پیش از کربنی شدن آنها انجام داد و در سال ۱۸۸۰ توانست

1. H. Sprengel



شکل ۶۲.لامپ فروزان سوان.

رشته‌های پایداری به‌دست آورد که دوام آنها به چهار صد ساعت می‌رسید ـ موفقیتی که به وی امکان می‌داد که لامپی با عمر دو ماه تولید کند.

شکل این لامپ تقریباً همانند شکل لامپ ادیسن بود. لامپ کوچکی که سر باریک آن، که از آن طریق لامپ را تخلیه و هوابندی کرده بودند به پایهٔ لامپ منتهی می‌شد، دو نوآوری دیگر نیز ویژهٔ آن بود، یکی اتصال سرهای کربن به دو رشتهٔ پلاتین، تا کنتاکت برقرار شود؛ دیگر سرپیچ فنری آن (شکل ۶۲).

سرانجام سوان در سال ۱۸۸۰ امتیاز آن را به‌دست آورد و لامپ روشن خود را در ماه اکتبر همین سال در نیوکاسل به نمایش گذارد. وی با به‌دست آوردن پشتوانه‌های قوی مالی، یک شرکت صنعتی پایه گذارد: *Swan United Electriclight Co* که از سال بعد شروع به‌کار کرد. سوان در نمایشگاه جهانی برق پاریس ۱۸۸۱ برای قرار دادن آویزی در اپرا و آویز دیگری در سالن کنگره الکتریسین‌ها استفاده کرد. برای توزیع برق از اندیشه‌ای استفاده کرد که در سال ۱۸۷۵ تجربه شده بود و آن تغذیهٔ لامپها به شکل موازی بود، و حال آنکه تا آن زمان تنها تغذیه به شکل زنجیری عملی می‌شد.

لامپ افروزه‌ای ادیسن: ادیسن نیز بنوبهٔ خود از ماه اکتبر ۱۸۷۸ به‌کار پرداخته بود و در همان حالی‌که درپی ساختن افروزه‌ها، در آغاز با کربنی کردن کاغذ می‌کوشید تصمیم گرفت که طرحهای خود را با به نمایش گذاردن همهٔ عظمتی که در آینده خواهند داشت، به‌نظر تودهٔ مردم برساند. چیزی

نگذشت که وسترن یونیون که بتازگی امتیازات آقای بل را دربارهٔ تلفن به‌دست آورده بود و بیم داشت از اینکه امتیاز استفادهٔ از روشهای آتی ادیسن به کسان دیگری واگذار شود به تحریکاتی پرداخت: گروهی از سرمایه‌داران عمدهٔ نیویورک، شرکتی با نام Edison Electric Light Company با سرمایهٔ اولیهٔ ۳۰۰۰۰۰ دلار تشکیل دادند. از ۳۰۰۰ سهم آن ۲۵۰۰ سهم بخاطر دستاوردهای آینده به ادیسن داده شد. این سرمایه‌داران، بنا به یادداشت ماتیو جوزف‌سون[1]، به طرحهای ادیسن، نه به‌کارهای انجام شدهٔ وی خود را متعهد کردند. این امر نشان می‌دهد که چه اعتمادی آقای ادیسن در دل آنها ایجاد کرده بود.

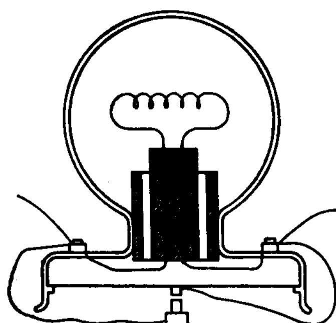
زغال جسمی بود که ادیسن از خواص آن بخوبی آگاه بود. طبیعی است که وی نخست آن را به‌کار برد. اما، کاغذ، ماده‌ای که آن را به زغال تبدیل می‌کرد در آغاز موفقیتی نداشت. این جسم لیفی، همگن نبود. ادیسن در همان زمان از بررسی فلزاتی که پیشینیان وی به‌کار گرفته بودند غفلت نمی‌کرد. از مارپیچ پلاتین استفاده می‌کرد، درحالی‌که فلزات موجود در معدن پلاتین و توریم را هم به‌کار می‌گرفت. در جریان همین بررسیها بود که به‌روش کاری سوان پی‌برد: تخلیهٔ لامپ با شیپورهٔ اسپرنگل؛ گرم کردن افروزه با استفاده از اثر ژول برای بیرون راندن گازهای محتوی در آن؛ بستن انتهای لامپ با مشعل. اجسام گوناگونی که آزمایش شدند نتیجهٔ مطلوبی ندادند؛ آنها شکننده، با روشنایی کم و پرهزینه بودند. ادیسن به زغال بازگشت و بدین نتیجه رسید که تنها یک لیف گیاهی همگن می‌تواند نتیجهٔ خوبی داشته باشد. بنابراین به خیزران و جست‌وجوی نمایشی آن دست زد.
طبعاً گیاهان متعددی را مورد آزمایش قرار داد، که از آن میان الیاف پنبه بود که آن را به‌عنوان کاغذ، سرانجام به ثبت رسانید.

این سال برای ادیسن و همکاران وی سال کار بی‌وقفه بود، اما پس از یک سال، خود لامپ و نیز سیستم اتصال افروزهٔ کربنی به سرهای فلزی و سرپیچ آن را، که هنوز نام وی را بر خود دارد، ساخته بود (شکلهای ۶۳ و ۶۴). از پلاتین نخست برای سرهای اتصال استفاده کرد، اما بعداً آن را با آلیاژی که مانند پلاتین ضریب انبساط شیشه را دارد، عوض کرد.

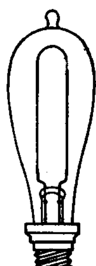
آغاز کاربرد سیستم ادیسن: اما این لامپ به‌نظر وی کامل نبود. در همان سال ساخت دینامی را بررسی کرد که بتواند برقی با ولتاژ ثابت بدهد و نوری با شدت ثابت ایجاد کند. وی در این کار از مشورتهای چند کارشناس برق مشهور در محیطهای خود استفاده کرد و بویژه دینام زیمنس را مورد بررسی قرار داد. دینام وی همین دینام زیمنس، اما مجهز به مغناطیسهای برقی بود.

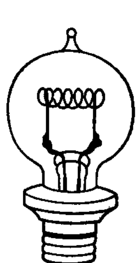
این مغناطیسها روبه بالا کشیده شده بودند و شکل آنها بسرعت برای خوانندگان رساله‌ها و

1. M. Josephson



شکل۶۳.نخستین لامپ فروزان ادیسن (۱۸۷۹).





شکل۶۴.لامپهای فروزان ادیسن با سرپیچ (۱۸۸۰ ـ ۱۸۸۱).

مجلات فنی مأنوس شد. نوع نخستین را *Longue-taille Mary Ann* نامیدند. وی در همین سال ۱۸۷۹ دستور داد تا چندین عدد از آن در منلو پارک ساخته شود. طی مدتی که این کارها دنبال می‌شد اطلاعاتی دربارهٔ آن به‌طور جسته‌گریخته به مطبوعات راه می‌یافت تا کنجکاوی مردم بیشتر شود. بدین‌ترتیب، زمانی‌که در هفتهٔ نوئل درهای منلو پارک با چندین لامپ فروزندهٔ روشن به روی توده‌های مردم باز شد صدها نفر از بازدیدکنندگان برای دیدن معجزه تازهٔ این جادوگر از جای خود به‌حرکت درآمدند. ادیسن همیشه متفرعن، که هنوز تنها چند لامپ به‌بهای شش ساعت کار دو نفر برای هر لامپ تولید کرده بود اعلام داشت که این لامپها را ۲۵ سنت خواهد فروخت و تولید آنها در هر روز به چند صد عدد خواهد رسید.

ادیسن در سال بعد همهٔ سیستم تولیدی خود را طرحریزی کرده بود. تأسیسات مرکزی برای روشن کردن تعدادی از بلوکهای مسکونی، توزیع برق به توسط سیمهای ورودی، کابلهای تغذیه‌کننده که در لوله‌های زیرزمینی روی عایقها گذاشته می‌شدند، انشعاب لامپها به‌طور موازی که با فیوز و کلید قطع و وصل و حتی کنتور برای تعیین مقدار مصرف مجهز بودند. این تأسیسات در تابستان سال ۱۸۸۱ در منلو پارک آزمایش شد و بعدها با اختراع سیستم توزیع سه‌سیمی که در میانهٔ سال ۱۸۸۳ آزمایش شد کامل گردید. در این مدت ادیسن خود را وقف به‌کار اندازی سیستم خود کرده‌بود. در سال ۱۸۸۱ همان سرمایه‌داران پشتوان وی شرکت تازه‌ای با نام Edison Electric Jlluminating Company of New York تأسیس کردند. از مقامات شهر اجازه گرفته شد تا در زیرزمین کابل‌گذاری شود بویژه در این کار از آخرین دستاوردها به بهترین وجهی استفاده شد. نیروگاه مرکزی در ۲۵۷ ـ ۲۵۵ پرل استریت در محله بانکها، دفاتر و کارگاههای کوچک، حوالی

جنوب مانهاتن برپا شد. ادیسن بناچار باز هم نوع تازه‌ای از دینام، *Jumbo* را ترکیب کرد که شش عدد از آن را یک ماشین بخار به‌کار انداخت. وی پیش‌بینی کرده بود که یک نیروگاه می‌تواند بین ۲۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ خانه را برق دهد. اما زمانی‌که نخستین نیروگاه در اول سپتامبر ۱۸۸۲ گشایش یافت بیش از ۸۵ مشتری نداشت و تنها ۴۰۰ لامپ را روشن ساخت. هزینهٔ ساخت این نیروگاه از ۶۰۰۰۰۰ دلار هم فراتر رفت.

مردم نیویورک با تردید زیاد به این وسیلهٔ جدید روشن‌سازی روی آوردند. ادیسن را تحسین می‌کردند اما به گاز دلبسته بودند زیرا از مدتها پیش ارزانترین وسیله بود. با این‌همه، ادیسن به تصاحب قارهٔ قدیم روی آورد.

در سال ۱۸۸۱ شرکتی با سرمایه‌گذاران انگلیسی تأسیس کرد که به اشارهٔ دانشمندان انگلیسی، نظیر جان هاپکینسون و امبروز فلمینگ[۱] برپا کردن نخستین نیروگاه را در هالبرن[۲] آغاز کرد. وی به سال ۱۸۸۲ در نمایشگاه برق کریستال پالیس[۳] شرکت کرد و سیستم خود را برای استفادهٔ مردم عرضه داشت.

ادیسن در آن زمان با رقابت شرکت سوان برخورد کرد. این شرکت از سیستم سنتی یک مولد برای هر خانه یا تأسیسات خصوصی یعنی همان سیستمی استفاده کرد که ادیسن هم به مشتریان خود حتی در امریکا پیشنهاد کرده بود. در ابتدا آثاری از کشمکش میان دو شرکت پدید آمد اما گفت‌وگو برای یکی شدن این دو شرکت به میان آمد. این گفت‌وگو چند سال به درازا کشید، زیرا ادیسن، برای نام رسمی شرکت، به نام دیگری جز شرکت خود رضایت نمی‌داد. او یادآوری می‌کرد که وی تنها مخترع ـ نه‌تنها لامپهای فروزان ـ بلکه سیستم کامل تولید و توزیع برق است. سرانجام تنها در سال ۱۸۸۸ بود که توافق ایجاد شد و شرکت تازه با نام Edison and Swan United Electric Company Ldt خوانده شد.

رقابتهای سوان و ادیسن: طی سالهای ۱۸۷۸ ـ ۱۸۸۲ دو پایه‌گذار این اختراع مواردی از رقابت داشته‌اند. هر دو موفق به ارائه مدلی از لامپ تخلیه شده از هوا شدند که گاهی همراه سیستمی کم‌وبیش پیشرفته از توزیع بودند و در همان زمان محصولات آنان با نوعی کنجکاوی مواجه می‌شد و لااقل طی چند سال زمینه‌ای از کاربرد یافتند. از میان آنهایی که ذکر شده‌اند می‌توان از یک شرکت انگلیسی Saint George Lane-Fox و یک امریکایی Hiram Maxim نام برد.

۱. Fleming Ambrose (۱۸۴۹ـ۱۹۴۵): مهندس انگلیسی برق، استاد الکتریسیته در دانشگاههای انگلستان.ـم.

۲. Holborn: ناحیه‌ای در شمال‌شرقی اسکاتلند.ـم.

3. Crystal Palace

شرکت لین ـ فاکس افروزه‌های خود را با الیاف گیاهی تولید می‌کرد، که گاهی بید گیاه بود که آن را تحت تأثیر نوعی وولکانش، اکسی‌کلرور روی و گوگرد قرار می‌داد. تخلیهٔ هوای لامپ با شیپورهٔ آلورنییا[1] بود که برپایهٔ ایجاد یک خلأ بارومتری به کمک دستکاریهای پیاپی انجام می‌شد و بوسیلهٔ آن نتایجی در ردیف نتایج شیپوره اسپرنگل به‌دست می‌آمد. در کار این دستگاه نیز چندین ظریفکاری بود تا گازهای محتوی زغال بیرون رانده شوند و افروزه به سیمهای برق اتصال یابد ـ و این خود کار بسیار دقیقی برای ساخت هر لامپ بود. وی همچنین نوعی تنظیم شدت روشنایی را پیش‌بینی کرده بود تا دارندهٔ چراغ نفتی در تعویض آن با لامپ برقی تردیدی به خود راه ندهد، زیرا نور این لامپ هم می‌توانست کم و زیاد شود.

هایرم ماکسیم ورقه‌ای را که به شکل U دوگانه یا M قالب زده شده بود می‌سوزانید و با گذرانیدن جریانی از اتر نفت، عمل آوردن آن را کامل می‌کرد. این رسوب هیدروکربنی سبب می‌شد که افروزه، پایداری فیزیکی بیشتری داشته باشد. مقاومت لامپ ماکسیم بین ۵۰ تا ۶۰ Ω و از مقاومت لامپ لین ـ فاکس ۷۵ تا ۱۰۵ Ω، کمتر بود. هر دو نوع لامپ عمری تقریباً برابر و حدود ۳۰۰ ساعت داشتند.

اما لین ـ فاکس گویا نتوانست برای تبلیغ محصول و سیستم خود پشتوانهٔ مالی لازم را به‌دست آورد، و نیز پشتوانهٔ مالی ماکسیم به‌اندازهٔ پشتوانهٔ مالی ادیسن کامل نبود. ماکسیم با وجود اقدامات تولیدی تا حدودی قابل توجه که در امریکا و اروپا انجام داد شهرتی درازمدت به‌دست آورد؛ اما نه در رشته برق بلکه در قسمت مسلسل‌سازی.

آقای لوسین گولار کمی بعد ناچار شد انواع فروزنده و تخلیه‌ای را در لامپی با یکدیگر تلفیق کند که با جریان متناوب کار می‌کرد. چنین لامپی برای نخستین بار، یک افروزهٔ کربنی شبیه افروزه‌های لامپهای دیگر را، با دو الکترود پلاتینی که جدا از یکدیگر کار گذاشته شده بودند. و نیز الکترود دیگری، مجتمع ساخته بود و در محیطی خلأ شده، در اثر تغذیه از خروجی یک ترانسفورماتور، تخلیهٔ برقی ایجاد می‌شد؛ ورودی این ترانسفورماتور با افروزه در مدار شده بود.

گرم کردن قبلی و افروزه‌های فلزی: از جمله نوآوریهای دیگر پایان این سده در رشته روشن‌سازی با برق، لامپی است که آقای و. نرنست فیزیکدان آلمانی آن را طرح، و بوسمان[2] از آ. ا. گ. برلین آن را تولید کرد و بدین ترتیب در آغاز سال ۱۸۹۷ شهرتی به‌دست آورد. این، لامپی بود که افروزهٔ آن که رشتهٔ نازکی از اکسید فلزی بود، بنا به طرحی از یابلوچکوف، قبلاً گرم می‌شد. آقای بوسمان به‌جای مخلوط نخستین اکسید توریم، اسید و اکسید دیتریم، قلیایی، افروزه‌ای از منیزیم به‌کار برد

1. Alvergniat 2. Bussmann

که بوسیله یک افروزهٔ کمکی از پلاتین یا با دو لامپ کوچک فروزنده گرم می‌شد تا رسانایی آن افزایش یابد. زمانی‌که این افروزه به آستانه‌ای از دما می‌رسید افروزهٔ منیزیمی در اثر گذر جریان برق ۲۰۰۰°C گرم می‌شد و در هوای آزاد می‌درخشید. این وسیلهٔ گرم کردن را پس از اشتعال منیزیم خارج می‌کردند. این لامپ نرنست با اینکه اجبار تخلیه هوا برای آن نبود به‌علت دشواری ساخت و کارکردن با جریان متناوب در سال ۱۹۱۰ از دور خارج شد، گرچه درکتابهای فیزیک تا مدتها از آن نام برده می‌شد.

افروزهٔ کربنی ادیسن و سوان در سالهای ۸۰ مصرف‌کنندگان را غافلگیر کرده بود؛ اما زمانی‌که کاربرد آن رواج یافت و به آن عادت شد معایب آن به فهرست درآمد: شکنندگی افروزهٔ کربنی و درخشندگی کم لامپ. دمای افروزه از ۱۶۰۰°C نمی‌گذشت و نور شیپورهٔ اوئر برای روشن‌سازی با گاز، زردی کمتری می‌داد. کارایی افروزهٔ کربنی با وجود این معایب، لااقل برای بعضی از کارها، هنوز هم کاربرد دارد.

فیزیکدانان آن زمان برای بازگشت به افروزه‌های فلزی تلاش می‌کردند. آنان پلاتین را به‌علت بهای گزاف آن رها کردند و به فلزات کمیاب: اسمیم یا «تانتال» روی آوردند، زیرا آنها را بهتر می‌شناختند و نیز به تنگستن و مولیبدن، که آنها را آزموده بودند. این فلزات می‌توانستند در خلأ تا دمایی بالاتر از دمای افروزهٔ کربنی پیش بروند و بسته به نوع آنها از ۱۹۰۰ تا ۲۲۰۰°C درجه گرم می‌شدند. گرایش به ساخت افروزه‌های ظریفتر، به ضخامت یک موی بود. بعداً به ترتیب در حدود سال ۱۸۹۸ آقای اوئر فون ویسباخ افروزه‌های اسمیمی، و آقای و. بولتن در ۱۹۰۳ از تانتال و آقای یوست[1] و هانامان[2] در ۱۹۰۴ از تنگستن ساختند. تولید آن یا با استفاده از منجر (حدیدهٔ مفتولکشی)، یا با گذرانیدن خمیری از میان یک الماس انجام می‌گرفت. این کار مستلزم ظریفکاریهایی بود. آقای و. د. کولیج در سال ۱۹۱۲، به‌هنگام کار روی لامپهای تخلیه‌ای که به نام وی شهرت یافته است، روش چکشکاری گرم را بنیان گذارد و با آن توانست تنگستن را برای مفتولکشی آماده سازد و سیمهای بسیار ظریفی تهیه کردند.

بازده این افروزه‌ها بسیار بالاتر از افروزه‌های کربنی بود. افروزهٔ کربنی برای تولید هر شمع اعشاری ۳/۵ وات مصرف می‌کرد و حال آنکه افروزه‌های فلزات مصرفشان ۱/۲ وات بود. اما دشواری تازه‌ای رخ نمود: افروزه‌های فلزی برخلاف نوع کربنی آنها در حالت سرد مقاومت الکتریکی بسیار کمتری از حالت گرم داشتند. در لحظهٔ روشن شدن جریانی که مصرف می‌کردند هفت برابر کار معمولی آنها بود، و بدین‌ترتیب، در صورت روشن شدن همزمان شمار زیادی از لامپها، یک

1. Just 2. Hanamann

مشکل فنی ایجاد می‌شد.

در برهۀ زمانی ۱۹۰۵ تا ۱۹۱۴ کاربرد لامپهای با افروزۀ تنگستنی به نوعی رواج کلی دست یافت. نور آنها سفیدتر از نور افروزۀ کربنی و به نور طبیعی نزدیک بود.

مزایای دیگر این لامپها مشخص شدند که از آن جمله امکان ساخت آسانتر لامپهای قوی ۵۰۰ شمعی با سیمهای اتصالی نازکتر بود. کار آنها با ۲۲۰ ولت آسانتر بود.

نظریۀ فروزندگی: در آغاز سدۀ بیستم، نظریۀ روشن‌سازی با فروزندگی، دیگر مبانی علمی خود را یافته بود. کارهایی که در دهه‌های پیش از آن در زمینۀ پژوهشهای تجربی و نظری دربارۀ مسألۀ تابش انرژی در چارچوب پیشرفت ترمودینامیک انجام گرفته بود، به تعریف سیه جسم و اطلاعات اولیۀ آقای کیرشهوف دربارۀ تشعشع آن انجامید و کمی بعد، به کشف قانون یوزف استفان در ۱۸۷۹ (مجموع انرژی صادر شده متناسب است با دمای مطلق به قوۀ چهار) و نیز قانون ویلهلم وین[1] سال ۱۸۹۳ که قانون استفان را با به‌حساب آوردن توزیع انرژی برطبق طیف طول موجها تکمیل می‌کرد کمک کرد. این اطلاعات علمی از صدور نور، کاربرد کربن را برای استفاده از قدرت بیشتر صدور نور، بهتر از فلز نشان می‌داد. بااین‌حال، فلزات که رسیدن به دماهای بالاتر را ممکن می‌ساختند، عیب دور شدن از شرایط سیه جسم را تا حدودی جبران می‌کردند.

کارهای لنگمیور: از آغاز دهۀ نخست سدۀ بیستم، اطلاعات علمی منظماً افزایش می‌یافت. یکی از پژوهشگرانی که نخستین تغییرات بنیانی صنعت تولید لامپهای فروزان را سبب شد، آقای اروینگ لنگمیور فیزیکوشیمیدان بود. بسیار جالب است که نتایج عملی که وی بدانها دست یافته بود به‌دنبال یک رشته پژوهشهایی بود که بدون نقشۀ قبلی، هدف معین و در کمال آزادی انجام شده بود؛ گرچه در آزمایشگاهی عملی شدند که شرکت جنرال‌الکتریک در سال ۱۹۰۱ آن را تأسیس کرده بود. این امر محتملاً از نمونه‌های بسیار پیشرس یک رشته تحقیقات علمی است که بدون هیچ‌گونه الزامی از سوی مقامات بالا در آزمایشگاهی انجام گرفته است که یک شرکت صنعتی، هزینه‌های آن را عهده‌دار شده بود و در پرتو آن تحقیقات، شرکت مزبور سود کلانی برد. خود آقای اروینگ لنگمیور گفته است که در آغاز تحقیقاتش در سال ۱۹۰۶، هیچ‌گونه اندیشۀ برنامه‌ریزی که برای کارفرما ایجاد سود کند در سر نداشته است. اما وی هیچ‌گونه دستوری دریافت نداشت و بهتر دید که که در رشته‌ای به‌کار خود ادامه دهد که آقای والتر نرنست، به‌عنوان استاد راهنمای وی برای رسالۀ دکترا در گوتینگن دربارۀ تفکیک گازها در اثر کنتاکت سیمی از پلاتین که از گرما سرخ شده

۱. W. Wien ۱۸۶۴ـ۱۹۲۸ فیزیکدان آلمانی که در سال ۱۹۱۱ بدلیل تحقیقاتش روی تشعشع انرژی از جسم جایزۀ نوبل دریافت داشته است.ـم.

بود، انتخاب کرده بود، در اینجا ما با نوعی تداعی اندیشه بین لامپ نرنست، که در زمان اشتعال، نخست تنها یک وسیلهٔ منفرد و دارای عمر کوتاه بود و گسترش مطالعاتی که نتایج صنعتی بزرگی درپی داشت روبه‌رو هستیم.

بدین‌ترتیب، لنگمیور با ابتکار خود در سال ۱۹۰۶ کار تحقیقی خود را دربارهٔ تشکیل اکسید نیتروژن براثر وجود هوای محبوس در یک لامپ بسته و مجهز به یک رشته سیم داغ شده در اثر جریان برق آغاز کرد. سپس شش سال بعد به ایجاد تعادل مخلوطهای گازی در دمای بالا و فشار کم علاقه‌مند شد. لامپ تجربی وی ساده بود و به لامپی از نوع فروزندهٔ مغازه‌ها شباهت داشت. لنگمیور بدین‌ترتیب درپی یافتن علت کوتاهی عمر افروزه، حتی از نوع فلزی آن در یک لامپ برآمد. وی پذیرفت که علت این امر وجود گازهای مانده در لامپ، علی‌رغم گرم کردن افروزه در خلأ، پیش از بستن لامپ است، زیرا این گازها به جدار داخلی شیشه و چند ناخالصی اجتناب‌ناپذیر می‌چسبند.

آقای لنگمیور این نتیجه را گرفت که تحقق یک خلأ کامل، هدفی دسترس‌ناپذیر است و نیز چنانچه به‌جای ایجاد خلأ، محفظه را با گاز خنثی، بویژه مخلوطی از آرگون و نیتروژن پر کنیم افروزه دیرتر متلاشی، تابندگی آن بیشتر، و عمر آن زیادتر می‌شود. دمای لامپهای محتوی گاز خنثی به $2500\,^{\circ}K$ می‌رسد. بنابراین شیپوره خلأسازی کارگاههای تولید لامپ، کنار گذاشته شد.

لامپهای دارای اتمسفر خنثی، گرچه در سال ۱۹۱۳ به بازار آمدند رواج کلی آنها در سالهای ۲۰ بود. این لامپها به‌علت وجود گاز در آنها، متحمل تلفات ناشی از کنوکسیون (گرمای ناشی از همرفت) می‌شدند. آقای لنگمیور باز این پدیده را، و نیز پدیدهٔ تبخیر تنگستن را بررسی کرد. وی پذیرفت که تلفات ماده در واحد سطح، برای افروزه‌های ظریف و افروزه‌های ضخیم، برابر است. با این‌همه، ظاهراً افروزه‌های ضخیم، با مصرف برابر انرژی، تابندگی بیشتری دارند. این فیزیکدان امریکایی، به جای افروزه‌های راستخطی معمول تا آن زمان، افروزه‌های مارپیچی را به‌کار گرفت. بعدها در سال ۱۹۳۶ از افروزه‌های دو مارپیچی استفاده کرد که سیم‌پیچی بوبینی از افروزهٔ مارپیچی بودند.

تحقیق دربارهٔ ترکیب جوّ موجود در لامپ، شکلها و محلهای افروزه، شکل خود لامپ و دستکاری سطح آن، مات بودن، آیینه‌ای بودن و ... پس از وی نیز ادامه یافت، و این چشمه ملتهب نوری باز هم پیشرفتهای پراهمیتی داشت.

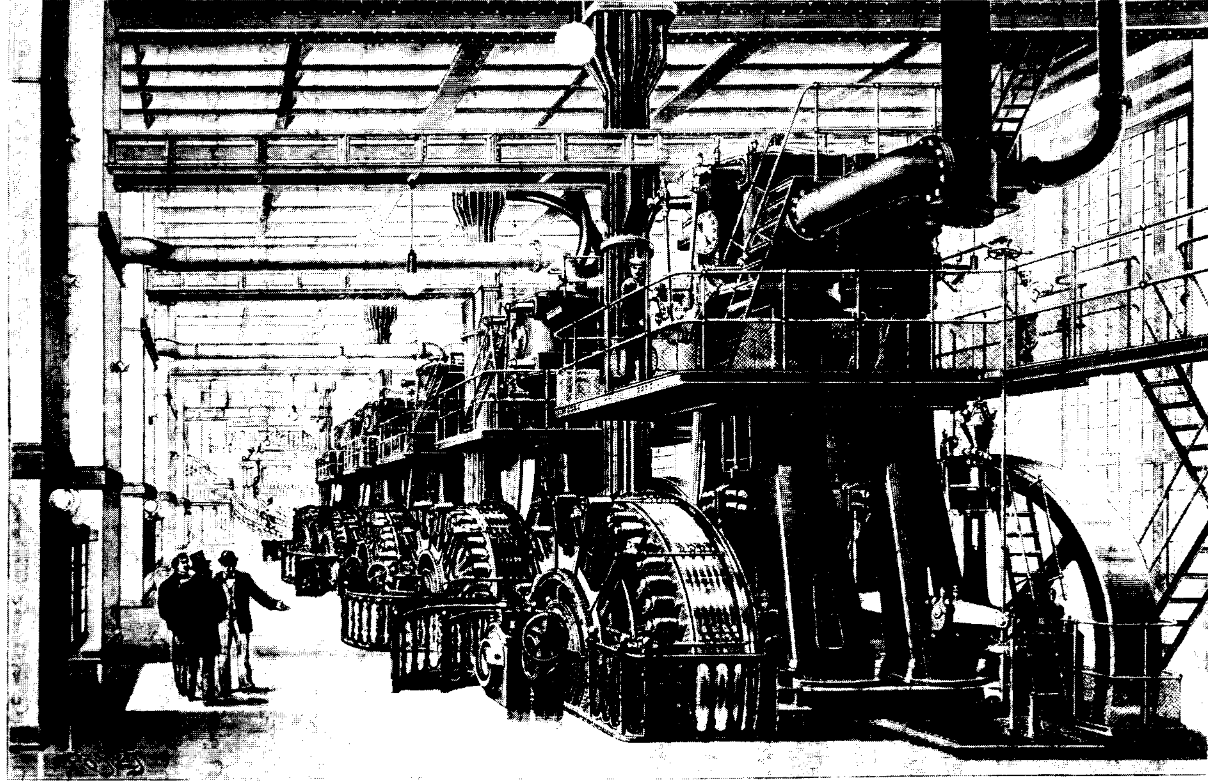
همهٔ این رشته بررسیها، از زمان آقای ادیسن و همدوره‌های وی تا کارهای آزمایشگاهی معاصر،

شاهد گویایی هستند که چگونه الهام برخاسته از قدری معلومات فیزیکی که آزمایشگری پراگماتیک را رهبری می‌کرد جای خود را به همکاری تنگاتنگ پژوهش بنیادی و تحقیقات صنعتی در جهت پیشرفت رشته‌ای از خلاقیت واگذارده است و در تغییر دادن روش زندگی مردمان سدهٔ ما تأثیر داشته است.

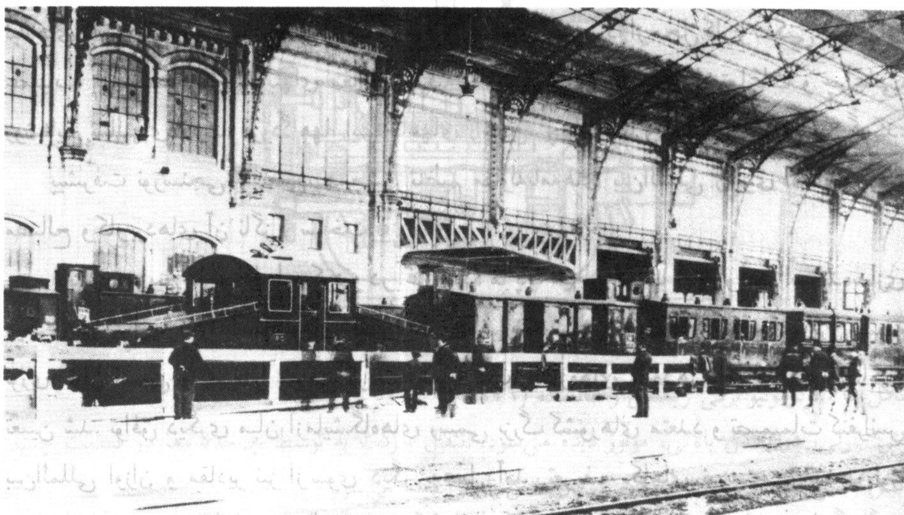
دنبالهٔ کارهای لنگمیور که تنها عنوان چندتایی از آنها در این کتاب آمده است چگونگی جهشهای تحقیقاتی به‌سوی مراحل تازه را باز می‌نماید. مثلاً، همین رشته تحقیقات که لامپهایی از نوع دیگر را ایجاد کرد این فیزیکدان را به کشفیات دیگری در فیزیک رهنمون شد. وی فرسایش افروزه‌های تنگستنی را با مکانیسم زیر توضیح داد. ذراتی از بخار آب که در لامپ تخلیه شده هستند در اثر گرما تجزیه می‌شوند. اکسیژن تشکیل اکسید تنگستن را می‌دهد که تصعید می‌شود؛ هیدروژن به هیدروژنهای اتمی تفکیک می‌شود که با اکسید تنگستن در دیوارهٔ لامپ برخورد می‌کنند و به‌علت فعالیت افزایش یافتهٔ شیمیایی، از نو آب را تشکیل می‌دهند و رسوبی از فلز بر جای می‌گذارند. چرخهٔ آب در همه مدت عمر لامپ ادامه دارد. تشکیل هیدروژن اتمی به‌دنبال شکستن مولکول آن به تکنیک نوینی در جوشکاری انجامید.

بخشی از هیدروژن مولکولی در اثر وجود قوس برقی بین الکترودهای تنگستن که به‌سوی محل جوشکاری روانه شده‌اند در برخورد با دیوارهٔ سرد از نو به مولکولهای هیدروژن تغییر شکل می‌دهند و مقدار زیادی گرما را واگذار می‌کنند.

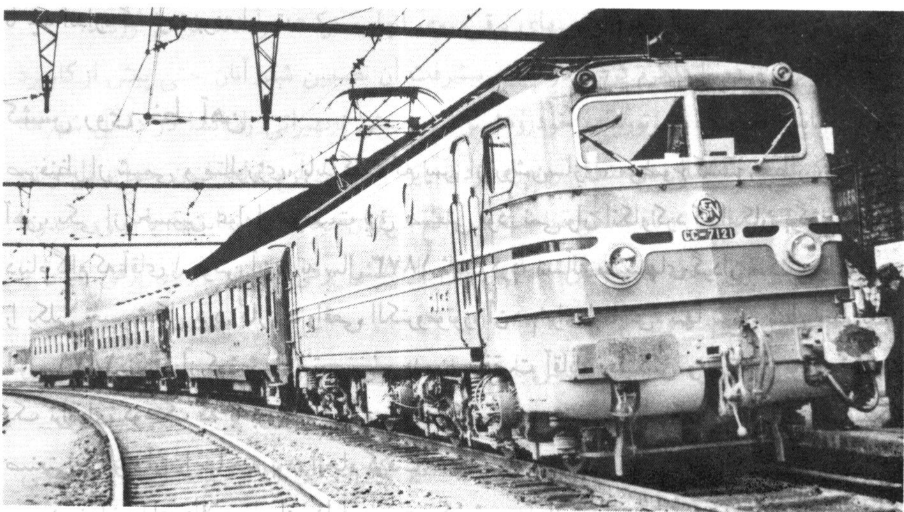
لامپها و روشنایی: با شروع دوره‌ای که روشنایی برق رواج کلی گرفت، خودکار روشن‌سازی هم دستخوش تغییر شکل قابل توجهی شد. در حقیقت این کار در سالهای ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ به دورهٔ متحولی گام گذارد و هنوز هم با همان آهنگ پیش می‌رود. مخترعان سالهای ۱۸۸۰ برای تشویق تودهٔ مردم برای به‌کارگرفتن ثمره کارشان، آویزها و جارهایی اندیشیدند که شکل آنها از وسایل گازی یا نفتسوز تقلید شده بود. بعدها، زمانی‌که چشمه‌های نوری فراوانتر و تولید آنها بیشتر شد، رابطهٔ بسیار شناخته شدهٔ ظرفیت تولید و انگیزهٔ تقاضا، گروه تازه‌ای از فن سالاران و کارشناسان روشن‌سازی را پدید آوردند و از آن قوانین بزرگی ایجاد کردند. این گروه بر دانشهای نورسنجی تکیه داشتند که در سدهٔ پیش تا اندازه‌ای به‌دست آمده بود. آنان رفته‌رفته جمع مهمی را تشکیل دادند که بحث دربارهٔ آنها در اینجا ممکن نیست. این جمع همان اندازه که بدلیل ساختن چشمه‌های نوری، به معنی دقیق کلمه ممتاز بود، با رفتارهای خود نیز شناخته می‌شد. هر دو تحول در دوره‌ای بستگی نزدیکی با یکدیگر داشتند.



تابلوی ۱۷. نیروگاه بارانداز ژماپ، در پاریس (۱۸۹۵-۱۸۹۶).



تابلوی ۱۸. لوکومتیو برقی .P. O (۱۹۰۰).



تابلوی ۱۸ مکرر. لوکومتیو برقی با بیشترین سرعت در جهان، ۲۴۳ کیلومتر در ساعت (۱۹۵۴).

در مورد وسایل انتشار یا انعکاس نور، بر آن بودند که لامپهای نوینی بسازند، و نیز برعکس، به نیازهای کاربردی نور مصنوعی، که اینک تنوع فوق‌العاده‌ای یافته بود، از محل کار و سکنی، سالنهای عملیات، آزمایشگاهها، ویترینهای مغازه‌ها گرفته تا روشن‌سازی سالنهای اجتماعات و چراغانی، روشنایی سالنهای بزرگ، فرودگاهها، ایستگاههای راه‌آهن، چهارراهها و غیره، بتدریج پاسخ گویند.

پیشرفت نورسنجی صنعتی، همچنین تنظیم مقاوله‌نامه‌های بین‌المللی را برای استانده کردن مصالح و کاربردهای آن ناگزیر ساخت.

ادیسن سرپیچ لامپ را طرح کرد و در آغاز سدهٔ ما پایهٔ میخی لامپ به بازار آمد. استانده‌سازی دیگری در سال ۱۸۲۹ استانده‌های فنی دیگری: اندازهٔ ته لامپ و خود لامپ، جای این چشمه نوری، توان اسمی و غیره را معرفی کرد، و بدین‌ترتیب، اندازه‌های واحدها برای مدلهای گوناگون تعیین شد. توافق دیگری میان آزمایشگاه‌های رسمی بزرگ کشورهای متعدد و تصمیمات کنفرانس بین‌المللی اوزان و مقادیر نیز از سوی دیگر به‌عمل آمد. تعریف یکاهای نورسنجی، شدت نور، درخشانی، شار درخشانی، روشنایی و غیره که برخی از آنها مانند «شمع» معروف، بسیار گوناگون تعریف می‌شد، معین شدند.

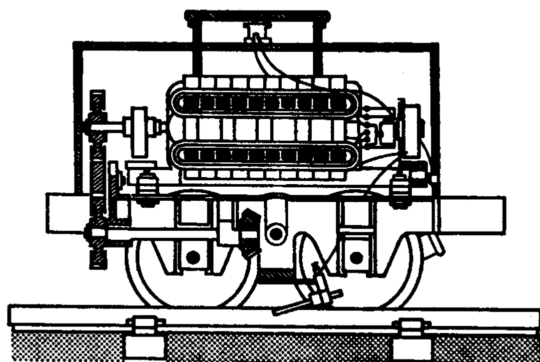
بنابراین، دیده می‌شود که نتایج متعدد راه افتادن عملی روشن‌سازی با برق، پس از اختراع دینام تا چه اندازه گسترده بوده است.

کشش روی خط آهن

صرفنظر از شیمی و متالورژی، باید گفت که پس از روشن‌سازی، موضوع کشش قطار روی خط آهن، یکی از نخستین عوامل موفقیت برق صنعتی بود. نمی‌توان انکار کرد که امکان برگشت‌پذیری دینام گرام که آقای ا. فونتن آن را به سال ۱۸۷۳ ثابت کرد، مسألهٔ ماشینهای گردان مگنتی یا دینامی را بکلی تغییر شکل داد. کاربرد واقعی الکتروموتور، آن‌هم برای نمایش، تنها شش سال بعد، یعنی سال ۱۸۷۹، پس از کوششهای تجربی و بدون موفقیت آقایان فلیکس و کرتین[1]، بویژه ساخت یک تراموای کوچک که با برق حرکت می‌کرد و کارخانهٔ زیمنس ـ هالسکه، به مناسبت نمایشگاه صنعتی برلین، آن را ساخته بود، انجام گرفت.

در زمان ما اصطلاح تراموای دلیل بر نوعی کشش بوسیلهٔ موتور برقی است؛ اما در سال ۱۸۸۰ این اصطلاح که از مدتها پیش رواج داشته است، بویژه اشاره بر خطوط آهن مستقر روی راههای شوسه می‌کرد و وسایل حمل‌ونقل عمومی که اسبها آنها را می‌کشیدند روی آنها حرکت می‌کردند.

1. Chrétien



شکل ۶۵.لوکوموتیو برقی زیمنس و هالسکه (۱۸۷۹).
برش طولی، در بخش بالایی، موتور دیده می‌شود؛ انتقال حرکت به توسط چرخدنده‌ها در قسمت چپ بخش بالایی است. تغذیهٔ برقی از ریل در بخش پایینی دیده می‌شود.

اومنیبوس‌هایی که روی ریل حرکت می‌کردند در آن زمان امکاناتی برای حل نخستین مشکلات راه‌آهن شهری، که چند سال بعد اتوبوسهای برقی روی آنها به‌حرکت درآمدند فراهم آوردند.

این کاربرد، مردم را دلگرم کرد و در نتیجه پیشرفت آن تضمین شد. آنان حتی پیش از کاربرد موتورهای ثابت صنعتی و موتورهای خودروها، نوعی جنبش تجهیزاتی را، ابتدا در داخل شهرها، سپس در کمتر از ۲۰ سال در منطقه روبه‌راه کردند. این جنبش طرح اولیهٔ فنون حمل‌ونقل و نیز توزیع جریان را در فواصل زیاد ممکن ساخت. در واقع می‌توان دید که این نمایشها، با رونق محدود، پس از مدت کوتاهی منجر به ساختن خطوط آهن با کشش برقی شدند. جریان برقی کردن با آهنگی کم‌وبیش منظم، هنوز هم ادامه دارد.

گامهای اولیهٔ این جنبش: در مورد کشش با برق برای خدمات شهری، چنین می‌نماید که دشواریها پس از اندک زمانی برطرف شدند.

نمایش زیمنس و هالسکه در سال ۱۸۷۹ نخستین کار در این راه بود (شکل ۶۵). طبیعی است که مانند همیشه، این کار سوابقی داشته است که روایتها ـ اگر نه افسانه‌هایی ـ را کم‌وبیش دامن زده‌اند. ازآن میان می‌توان از کار آقای تامس دونپورت به سال ۱۸۳۴ در ممالک متحدهٔ امریکا، و نیز حرکت آقای رابرت دیویدسون در ۱۸۳۸ در اسکاتلند و بالاخره نمایش چارلز پیج در ۱۸۵۰ باز در ممالک متحدهٔ امریکا نام برد که گویا موفقیت بیشتری داشته است و چندین

کار دیگر در دهه‌های بعد، در کشورهای دیگر. اما در ثبت اختراع این کار هم، مانند پیش از آن، مطلبی دربارهٔ ساخت و آزمایش نیامده است و برپایه آنچه که از منابع جریان صنعتی پیش از سال ۱۸۷۲ ـ ۱۸۷۰ به‌دست ما رسیده است ما می‌توانیم یقین کنیم که همه این کارها به شکست انجامیدند.

در این مورد ما در موقعیتی هستیم که هم‌اکنون با آن آشنا شدیم. سطح تکنیک باید آن اندازه بالا باشد که نوآوری بتواند به بهره‌برداری تجارتی بیانجامد. از موقعیتهای اقتصادی سخنی نرفته است زیرا در واقع، آنها زیاد شناخته شده نیستند اما می‌توان از این لحاظ فرآیند زیر را توضیح داد: در مراحل نخست، سودآوری حمل‌ونقل شهری، بویژه در شهرهای بزرگ، اصولاً شهرهای بعضی ایالتهای ممالک متحده، یا پرجمعیت، مثل شهرهای اروپا؛ در مراحل دوم، کشش سرویس، معادن و کارخانجات، ایستگاههای قطار، خطوط مونتاژ، سپس برای حومه و سرانجام خطوط بزرگ، حتی پیش از جنگ جهانی اول در اروپا.

راه‌حلهای اولیه: راه‌آهنهای کوچک و نمایشی این مؤسسه آلمانی نوسازی شدند و بویژه پس از بروکسل، وین و لندن؛ و در پاریس به مناسبت نمایشگاه برق سال ۱۸۸۱. در این زمان از حرکت قطارهای کوچک نوع «باغ وحش»[۱] دو سال گذشته بود. خودروها که ناگزیر براساس مدل اومنیبوس‌های امپراطوری آن زمان ساخته شده بودند می‌توانستند ۵۵ نفر را با سرعت ۷۵ کیلومتر در ساعت جابه‌جا کنند. سرعت آن به‌علت اینکه از محلهٔ بسیار شلوغ، ازکنکورد به پاله دولند وستری نمایشگاه می‌گذشت از ۱۷ کیلومتر در ساعت بیشتر نبود. دشواریهای گوناگونی در برابر سازندگان این راه قد علم کرده بودند. آنان می‌بایست در جادهٔ خاکی ریل را در شوسه جاسازی کنند و چون گل بسرعت آن را می‌پوشانید نمی‌توانست به سیم رابط برگشت کمک کند. آنها می‌بایست تغذیه را به کمک دو سیم رابط هوایی و نیز کنتاکتهایی تأمین کنند؛ زمانی‌که به پیچیدگی کار قرقره‌های کلاسیک کنتاکت، که کار آنها در تعدادی از شهرهای جهان هنوز رضایت‌بخش است بیندیشیم: لوله‌های برنجی که از طول چاک زده شده‌اند و میله‌ای به شکل ماکو، که غلتکی آن را فشرده کرده، همراه فنرها، طنابهای کشش و سیمهای اتصال در آن می‌لغزید؛ جای شگفتی دارد.

به‌هرتقدیر، زیمنس و هالسکه با سهولت تمام مسألهٔ تغذیهٔ موتور الکتریکی خودرو را حل کردند: ریل مرکزی خط در سال ۱۸۷۹، سیم رابط هوایی یا ریل خط در ۱۸۸۱، و نیز تعبیه‌های گوناگون مربوط به انتقال انرژی موتور به چرخها و شرایط راه‌اندازی و ترمز. این موتور، که یک دینام ساده بود، بین دوآکسل طوری گذاشته می‌شد که محور موتور موازی آکسلها قرار می‌گرفت. انتقال حرکت با

۱. در این قطارها، انسان و حیوان، مجتمعاً مسافتهای کوتاهی را طی می‌کردند. ـ م.

کمک تسمه‌هایی انجام می‌شد که از شیاری که در لاستیک دور چرخ ایجاد شده بود می‌گذشتند.

سیستمهای دیگری نیز در سال ۱۸۷۹ آزمایش شدند، محور این موتورها، عمود بر آکسلها بود و انتقال حرکت بوسیله چرخدنده انجام می‌گرفت. نوعی رئوستا که روی توپیهای کنتاکت آن یک دسته جابه‌جا می‌شد تا راه‌اندازی تدریجی ممکن شود، وسیلهٔ سرعت و ترمز، که طبیعاً از نوع معمولی بود.

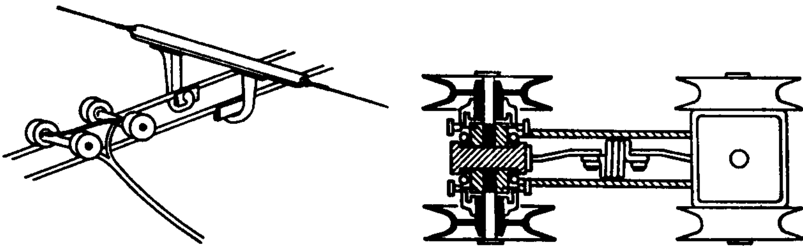
بدین‌ترتیب، همهٔ دشواریهای کشش برقی بسرعت برطرف شدند. تراموای برای خدمات شهری بود و با ظاهری پیش‌پا افتاده کار خود را شروع کرد. زیمنس و هالسکه در ماه مهٔ ۱۸۸۱ نخستین خط ۲۵۰۰ متری، که چند محله برلین را دور می‌زد افتتاح کردند. این خط با نام خط گروس لیشترفلده[1] شهرت یافت. تا حدود سال ۱۸۸۶ خطوط متعددی در انگلستان، اتریش و سویس تأسیس شدند. تعجب ندارد که چندین خط از آنها در خدمت معادن بودند. در فرانسه، این نوآوری در سالهای بسیار بعد در ۱۸۹۰ درکلرمون ـ فران عملی شد.

از همان سالیان نخست، برای رفع نواقص توزیع جریان برق با تجهیز خودروها با باتریهای انباره‌ای می‌اندیشیدند. در فرانسه، آقای نیکلا رافار[2] آزمایشهای چندی انجام داد که بعضی از آنها دربارهٔ راهپیماهای بدون ریل بود. وزن و حجم زیاد باتریها و نیز عمرکم آنها، مناسب کار برای تودهٔ مردم نبودند.

تکنیک امریکایی: سرانجام به کمک موتور با جریان مستقیم با ولتاژ ۵۰۰ یا ۶۰۰ بود که تراموای تقریباً در همه شهرها به‌حرکت آمدند. این سیستم را مهندسان امریکایی به‌طور قطعی به‌کار انداختند و به رواج آن در سالهای ۱۸۹۰ ـ ۱۸۸۵ در شهرهای امریکای شمالی دست زدند.

نخستین نمایشهای این وسیله در ممالک متحدهٔ امریکا بوسیلهٔ ادیسن نخست در ۱۸۸۰ در منلو پارک انجام گرفت، سپس با همکاری آقای استفان د. فیلد[3] که از امتیاز تقدم برخوردار بود، در سال ۱۸۸۳ بویژه در شیکاگو. این وسیله از نظر تکنیکی، نسبت به تراموهای اروپا چیز تازه‌ای نداشت. اما نوعی رقابت بین چندین مؤسسه را سبب شد. مردم امریکا هنوز به استفاده از وسایل برقی خو نگرفته بودند، گرچه تأسیساتی در سال ۱۸۸۴ بوسیلهٔ آقای ج. هنری درکانزاس‌سیتی برقرار شده بود و آقای لئو دافت[4] چند کیلومتر خط آهن بین بالتیمور و همپدن[5] در سال ۱۸۸۵ کشیده بود و یک قطار کوچک برقی بوسیلهٔ س. ج. وان دپول[6] در نمایشگاه تورنتو در همین سال به نمایش گذاشته شده بود.

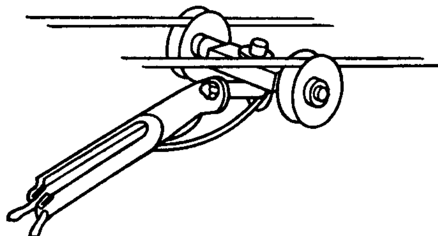
1. Gross-Lichterfelde 2. N. Raffard 3. S. D. Field 4. Leo Daft 5. Hampden
6. C.J.Van Depoele



شکل ۶۶.چرخکی که در بالای سیمها حرکت می‌کند.
در سمت راست، نمایه و برش افقی. چرخهای دوطرف، مستقل از یکدیگرند.
یک فنر مارپیچ دو جفت چرخها را به یکدیگر مرتبط ساخته است تا ناهمواری سیم رابط مستهلک شود.

این آزمایشها با همهٔ محدودیت خود، نتایج سودمندی داشتند که اخذ برق از سیم هوایی با یک چهارچرخه، که امریکاییها آن را trolley (و فرانسویها در همان زمان آن را trolet) نامیدند زیرا به چهار چرخ شیاردار مجهز بود و روی دو سیمی که موازی یکدیگر کشیده شده بودند حرکت می‌کرد (شکل ۶۶) از آن جمله است. بعداً روروکی با دوچرخ را آزمایش کردند که سیمهای برقدار از بالا بدان اتصال داشتند (شکل ۶۷). گفت‌وگو دربارهٔ این دو نوع بسیار بالا گرفت و درعین‌حال برای این روروکهای هوایی، سوزنها و تقاطعهایی گذاشته شد.

بالاخره نوع کنتاکت از پایین پیروز شد و آن را با تقلیل سیمها به یک سیم و یک چرخ که روی دو شاخهٔ گردنده‌ای سوار بود، ساده کردند. راه‌حل اخیر مستلزم برگشت جریان برق به توسط ریلی بود که اطاق روی آن حرکت می‌کرد. این روشی بود که این مؤسسه آلمانی در سال ۱۸۸۱



شکل ۶۷.چرخکی که در پایین سیمها حرکت می‌کند.

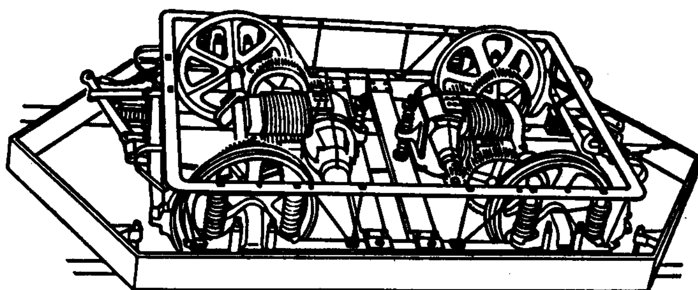
در پاریس، بدون موفقیت اجرا کرد. اما امریکاییها سیستمی برای تمیز کردن ریلهای برقدار که در زیر اطاق کار گذاشته می‌شد اندیشیدند. مشکل برقرسانی خط از فواصل دور بوسیله سیم اصلی را آقای وان دپول در میناپلیس و آقای فرانک ج. اسپراگ[1] در ریچموند برطرف کردند.

دیده می‌شود که این آفرینش را، که نسبتاً سریع انجام گرفت نمی‌توان یک اختراع، به معنی دقیق کلمه، دانست. این نوعی نوآوری بود که در متنی از تکنیک با سطحی شایسته و با استفاده از راه‌حلهای هوشمندانه، برای اقتصادی کردن کاربرد آن، پدید آمده در آن زمان شهرهای امریکا، در واقع نوعی سیستم اجتماعی ـ اقتصادی را تشکیل می‌دادند که موفقیت نوآوریها را تضمین می‌کرد. این شهرها، که بسیار گسترده، با خیابانهای عریض و تقریباً همیشه مستقیم بودند شرایط خوبی برای تأسیسات و بهره‌برداری داشتند. تراموای برای شهرنشینان امریکایی می‌توانست از لحاظ سرعت و رفاه مسافران، نقطه مقابل راههای شوسهٔ بسیار بد آنجا باشد.

موفقیت اسپراگ: آقای ف. ج. اسپراگ نخستین کسی بود که آیندهٔ این وسیله را تجزیه و تحلیل کرد و تصمیم به فعالیت در این کار گرفت. وی همراه با ادیسن برای چند سال کار کرد و بخشی از مغز سازندهٔ وی شکل گرفت. وی شرکتی برای کار در ریچموند در ویرجینیا تأسیس کرد، این، نخستین خط تراموای بود که مسافت زیادی، حدود ۲۰ کیلومتر را می‌پوشانید. او راه‌حلهای موجود را فراگرفت و چند ابتکار شخصی بدانها افزود که مهمترین آنها آویزان نگاهداشتن موتورها بود. وسیلهٔ اسپراگ برای هر آکسل یک موتور داشت. هر موتور که محور حرکت‌دهندهٔ آن موازی آکسل بود یکی از سرهایش بوسیلهٔ دو بالشتک روی آکسل تکیه می‌کرد و سر دیگر آن به کمک فنرهای فولادی از شاسی آویزان بود (شکل ۶۸). اتصال برقی آن به شکل کلاسیک و با فازهای زیر بود: راه‌اندازی دو موتور به شکل زنجیری، کوپلاژ موازی به‌هنگام افزایش سرعت، سپس شنت کردن (انشعاب دادن) القاگرها برای دست یافتن به حداکثر سرعت.

به‌طورکلی آقای اسپراگ وسیلهٔ بسیار زمختی را طرحریزی کرده بود که در آن شرایط بد، سالیان درازی روی خاک، ناشی از وضع خراب شوسه و انقلابات جوی، دوام آورد. او همچنین سرویس سریعی برای آن پیش‌بینی کرده بود و زمانی‌که خط وی در فوریهٔ ۱۸۸۸ گشایش یافت ۴۰ دستگاه در اختیار داشت. مردم همان‌طورکه در برابر نوآوریهای تکنیکی متعددی عمل می‌کردند در این مورد هم یکباره به آن روی آوردند و همهٔ مؤسسات که در آن زمان کار خود را منحصر به ساختن ماشینهای الکتریکی کرده بودند: وستینگهاوس، تامس ـ هوستن، ادیسن به کار تراموای روی آوردند. خط ریچموند بزودی اهمیت تاریخی یافت.

1. F. J. Sprague



شکل ۶۸.موتور با چرخ وسط (بوجی) تراموای اسپراگ.
موتورهای برقی آویزان دیده می‌شوند. یک سر هر موتور روی فنری عمودی که روی بازویی تکیه کرده است، قرار دارد.

... و نتایج آن: این پیشرفت در ممالک متحدهٔ امریکا سریع بود. از همان آغاز کار، اطاقهای تراموای چنان راحت بودند که هیچ وسیله دیگری آن‌طور نبود؛ تکانها حذف شده بودند؛ روشنایی و گرمای برقی همراه با سرعت حرکت برای تشویق مردم. این وسیله، یک معجزهٔ واقعی بود و شگفتی‌آور نیست که تراموای همچون جالبترین اختراعات پایان سده شناخته شود ـ سده‌ای که اختراعات آن بیش از سده‌های پیش بود. درکمتر از ۱۰ سال، حدود ۲۳۰۰۰ کیلومتر خط گذاشته و نزدیک به ۴۰۰۰۰ اطاق ساخته شد. این آغاز خشن نتایج سریعی برای ساختار صنعت برق امریکا داشت. شرکتهای کوچکی که حول مبتکران منفرد تشکیل شده بودند بسرعت بوسیلهٔ گروهها مالی با سابقه‌تر، براش، وان دپول بوسیلهٔ تامسن ـ هوستن، اسپراگ بوسیلهٔ ادیسن جذب شدند. سپس دو تا از سه تا بزرگترین شرکتهای آن زمان تامسن ـ هوستن و ادیسن در سال ۱۸۹۲ در یکدیگر ادغام شدند و شرکت جنرال‌الکتریک را تشکیل دادند. تجهیزات تراموهای شهری امریکا با این جنبش تمرکزگرایی بهتر شدند، اما تنها علت این نبود. بهره‌گیری از نیروهای متحرک به شکل برق، حمل و توزیع آن مستلزم سرمایه‌گذاریهای بزرگ بود. شرکت جنرال‌الکتریک به محض تشکیل آن پس از ادغام، خود را مالک نیمی از اختراعاتی یافت که از سال ۱۸۷۷ به بعد برای استفاده از برق به ثبت رسیده بودند. بزرگترین رقیب این شرکت، وستینگهاوس بود. همچنین حتی پیش از آنکه عصر برق صنعتی به‌طور واقعی آغاز شود، شرکتهای سرمایه‌دار امریکایی، آیندهٔ این صنعت را، تنها درکشور خود، که از طریق عوامل اروپایی خود در سراسر قارهٔ قدیم در دست داشتند.

رواج کلی تراموای: خود این وسیله اروپا را با وجود ابتکارهای پیشرس صنعتگران آن قاره، به‌آهستگی در نوردید. پیشاپیش همه، آلمان، بعد فرانسه (نخستین تراموا‌های با برق انباره‌ای در پاریس در سال ۱۸۸۸ دیده شده است)، انگلستان و ایتالیا نخستین کشورهایی بودند که با آن مجهز شدند و بالاخره دیگر کشورها نیز از آن بهره گرفتند. در آن‌سوی اروپا، همهٔ شهرهای بزرگ کشورهای مستعمره، از نظر سیاسی یا اقتصادی، طی یک دهه از آن برخوردار شدند. دیده می‌شد که در خیابانهای آنها تراموای در حرکت است بدون اینکه هیچ‌یک از مسائل این تکنیک جدید را حل کرده باشند. در برتری اخذ برق از ریلی که در خاک کارگذاشته شده‌است یا سیم هوایی بحثهایی وجود داشته است. اما تقریباً در همه‌جا سیم هوایی ترجیح داده شد. ریل گذاشته شده در کانال به‌طور کامل ویژهٔ محلات اعیان‌نشینی شد که از خراب شدن مناظر طبیعی بوسیله سیمها و دکلهای نگهدارندهٔ آنها ناراحت می‌شدند. تنها واقعیت حقیقتاً ارزشمند همانا آغاز تغذیهٔ تراموای با جریان متناوب، و در سال ۱۸۹۵ با جریان چند فاز بود.

از سوی دیگر، پس از مدت کوتاهی، کاربرد تراموای، دیگر سودآور نبود و شرکتها بی‌درنگ اعانهٔ ملی اعلام کردند. در آستانهٔ جنگ جهانی اول، اتوبوسها به رقابت با تراموا‌ها به خیابان آمدند. اما بازتابهای این محصولات نخست خودنمایی می‌کردند.

مرحلهٔ تراموای در آغاز کشش با برق، تنها یک حادثه منفرد نبود، بلکه شروع برقی کردن راه آهن سنتی بود، که با رواج دیزل، محو کلی لوکوموتیوهای بخاری را طی شصت سال سبب شد.

راه‌آهن مادر شهرها در ابتدا طرح ایجاد خطوطی در نظر بود که از ترافیک شهری، یا از بالا بوسیله پلهای روگذر، یا زیرزمین، مستقل بودند. در شهرهایی که چنین خطهایی برقرار شده بود ـ مانند لندن، نیویورک و شیکاگو ـ لوکوموتیوهای بخاری جای خود را به کشش با برق سپردند. در شهرهای دیگر نظیر پاریس و برلین، طرحهای راه‌آهن مادر شهری در مواردی پس از دهها سال گفت‌وگو راه‌حل منطقی خود را یافتند.

در شهر پاریس قوانین سالهای ۱۸۹۷ و ۱۸۹۸ دربارهٔ ایجاد شبکهٔ راه‌آهن ما در شهری به جنگی طولانی انجامید که حدود سی سال این شهر با دولت، یعنی شرکتهای راه‌آهن مخالفت می‌کرد. هدف شهردارها برقرارکردن یک شبکهٔ حمل‌ونقل سریع بود تا بتوان همشهریها را در داخل شهر جابه‌جا کرد. قطارهای راه‌آهنهای سراسری منطقاً برای این کار مناسب نبودند زیرا عرض خطوط و فاصلهٔ ریلها از یکدیگر نسبت به خطوط بین‌المللی کوچکتر بودند. شرکتها بویژه میل داشتند که بوسیلهٔ تونلها یا ریلها روگذر، خطوط آهن را به یکدیگر متصل کنند، تا ایستگاههای بزرگ

از حالت بن‌بست خارج و به یکدیگر مرتبط شوند. پس از چند حادثه، نزدیکی نمایشگاه عمومی ۱۹۰۰ نوعی سازش بین این دو جبهه ایجاد کرد: عرض خط، معمولی و فاصله ریلها از یکدیگر کم شد و با وام از شهرداری و سرمایهٔ خصوصی یک شرکت دارای امتیاز نیز سرمایهٔ لازم تأمین شد.

کارهای اولیه در پایان سال ۱۸۹۸ با مدیریت آقای فولژانس بین‌ونو[1] شروع شد؛ وی در واقع شبکهٔ متروی پاریس را، که مدت چهل سال، تقریباً بدون تعمیرکار کرد، ساخت. طبیعی است که وسایلی از نوع جدید را در حساب نمی‌آوریم: نخستین خط در ۱۹ ژوئیه ۱۹۰۰ گشایش یافت. ده سال بعد، طرح اولیه کاملاً پایان یافته بود؛ اما گسترش شبکه به‌طور منظم، نخست داخل شهر، سپس با توسعه‌های Extra-muros (برون شهری) از سال ۱۹۳۴ ادامه داشت. از همین دوران رفته‌رفته پذیرفته شد که طرح اولیهٔ مترو مانع گسترش جغرافیایی پاریس از محدوده کوچک خود است. گسترش شهرکهای حومه در سالهای ۵۰ که در پرتو وجود اتومبیل و تکنیک حمل‌ونقل مشترک با کشش با برق انجام گرفت می‌بایست تکنیکهای شهرسازی را دوباره به جریان انداخته باشد؛ یا اینکه به‌عبارت دقیقتر، در داخل این مجموعهٔ ناآرام تکنیکها کامل شده باشد. می‌توان ادعا کرد که در آن زمان، رقابت گروههای مالی در اواخر سدهٔ پیش سبب شد که اتصال خطوط آهن شبکه‌های بزرگ با شبکه‌های درون شهری، به‌طور کامل کنار گذارده شود. در واقع می‌بایست به‌بهای سرمایه‌گذاریهای بسیار گزاف، یک شبکهٔ دیگر شهری به راه و ریلهای معمولی بیفزایند ـ کاری که اگر نحوهٔ تفکر بهتری بر تصمیمات نخستین، حکومت داشت بدون شک از آن پرهیز می‌کردند.

پدیدهٔ مترو در جهان بسیار زودتر از تصمیمات گرفته شده در پاریس، لندن ۱۸۶۳ نیویورک ۱۸۶۸، شیکاگو ۱۸۹۲ و بوداپست ۱۸۹۶، گلاسکو ۱۸۹۷ خود را نشان داده بود. کهنترین آنها، با کشش با برق و شبکه‌های توسعه یافته نوسازی شدند. پیش از جنگ جهانی اول، بسیاری از شهرهای بزرگ در سایهٔ مزایای برق، این جنبش را دنبال کردند: بستن (۱۹۱۰)، برلین (۱۹۰۲)، فیلادلفی (۱۹۰۷) و هامبورگ (۱۹۱۲)، همان‌طورکه می‌دانند این تکنیک جابه‌جا کردن گروهی هنوز به‌پیش می‌رود.

نخستین خدمات بین شهری: سرانجام یک پدیدهٔ بینابین تراموای وکاربرد کشش برقی در شبکه‌های بزرگ، در سالهای ۱۸۹۰ با تأسیس خطوط بسیار طویل و واگنهای سرباز ویژه تأسیس شد. این خطوط برای خدمت در حومه شهرهای بزرگ و حتی خدمات بین شهری و یا اینکه جهت حمل‌ونقل در بعضی از دره‌های کوهستانی ایجاد شدند.

برای پاسخ دادن به مقتضیات گوناگون، بویژه وزن واگنها و سرعت مناسب قطارهای باری،

1. Fulgence Bienvenüe

موتورهای جدیدی بررسی شدند. استقرار موتورها روی بوجیهای کشنده، انتقال حرکت از محور موتور به آکسل نیز باید حل می‌شد. بر آن شدند که به همهٔ قطعات، از جمله موتور، استحکام زیاد بدهند. قطعات را با یکوری کردن حمایت می‌کردند و بدین‌ترتیب از آنها نه‌تنها در برابر آب و گل، بلکه در برابر پرتاب اجسام جامد هم حمایت می‌شد. کثرت راه‌حلهای پیشنهادی طی این چند سال پایانی سدهٔ نوزدهم، قدرت الکترومکانیک آن زمان را آشکار می‌سازد.

کشش برقی در شبکه‌های بزرگ: بدین‌ترتیب، نخستین لوکوموتیوهای برقی، که پس از مدت کوتاهی بنوعی تازه‌ای از کشش روی شبکه‌های با ترافیک زیاد تبدیل شدند، ساخته شد. این کار نخست از طریق میان بُر زدن لوکوموتیوهای مانوری شروع شد و شرکتها رفته‌رفته با کشش برقی مأنوس شدند: مانور در ایستگاه جور کردن قطارها، یا کشش واگنهای مسافری یا باری در مسافتهای کوتاه راههای زیرزمینی. آقای آندره بلوندل چنین می‌نویسد: «تاریخ لوکوموتیوهای برقی در ابتدای کار را می‌توان نوعی مصیبت‌نامهٔ طویل نامید زیرا در آن جز آزمایشهای بی‌سرانجام چیز دیگری وجود ندارد.» همین نویسنده در سال ۱۸۹۸ لوکوموتیوهای سالهای ۱۸۸۸ تا ۱۸۹۲ را موتورهای تاریخی می‌نامد. بدین‌ترتیب، آنها تحول سریعی داشته‌اند و تنها تاریخ دوران کوتاهی از آن را می‌توان مصیبت‌نامه دانست.

علاوه‌براین، موتورها، استقرار و کوپلاژ آنها، یکی از مشکلات ویژهٔ این نوآوری مربوط به خط الکتریکی و تغذیهٔ آن بود. نمایهٔ تغذیه خطوط توزیع‌کنندهٔ جریان در فواصل زیاد، بیشتر یک شکل اقتصادی بود تا فنی. شرکتها، پیش از تعهد به سرمایه‌گذاریهای کلان، مایل بودند بدانند که آیا لوکوموتیوهای برقی می‌توانند نیازهای جابه‌جاسازی مردم را در آینده برآورده سازند. همچنین غالباً در سالهای ۱۸۹۰، این آزمایشها با موتورهایی انجام گرفته بودند که از برق باتریهای انباره‌ای، با تکنیکی که آقای رافار برای انطباق آن انتخاب کرده بود، تغذیه می‌شدند. یکی از بررسیهای بسیار مخصوص، طرز فکر عصری را بخوبی می‌نمایاند که چگونه صاحبان روشن‌سازی با برق، مورد انتخاب را به مشتریان خود عرضه می‌کردند. آنها وی را بین چند مولد جریان برق با ماشین بخاری که در خانه کارگذاری شده است یا با ملزومات جریان برق از بخش توزیع قرار می‌دادند. این همان کاری است که هایلمان در فرانسه برای شرکت راه‌آهن غرب انجام داد و در سالهای ۱۸۹۳ ـ ۱۸۹۴ نوعی لوکوموتیو را به‌طور آزمایشی به‌حرکت درآورد که با فروتنی نام *Fusée* (موشک) را روی آن گذاشته بود تا خاطرهٔ *Fusée* آقای استیونسن زنده شود.

لوکوموتیو هایلمان برق خود را از ماشین بخار و دو دینام می‌گرفت (شکل ۶۹). این ماشین بخار

مدلی با شش استوانهٔ عمودی بود که دارای سه انبساط ماشین ویلنس بود (صفحهٔ ۹۳). تعادل این ماشین موضوع بررسیهای پیشرفته‌ای شد: این دو دینام، شش قطب داشتند که آنها را شرکت براون ـ باوری ساخته بود و به شکل موازی کوپلاژ شده بودند. آنها چهار موتور با شاتون توخالی را که هریک مستقیماً روی یکی از آکسلهای دو بوجی کشنده، کوپلاژ شده بودند تغذیه می‌کردند. این نوع کوپلاژ تکرار همان روش شرکتهای امریکایی تامس ـ هوستن و ادیسن بود که برای عملی کردن آن جهت نخستین لوکوموتیوهای سنگین، ۳۰ تنی، ساخت خود کوشیده بودند. وانگهی، پس از اندک مدتی، که به تنازهای بسیار بالا دست یافتند، دیگر نمی‌بایست از این وسیله استفاده کنند. روش انتقال حرکت از موتور به محورهای حرکت‌دهنده (آکسل)، که بسیار رضایتبخش بود، انتقال چرخدنده‌ای بود.

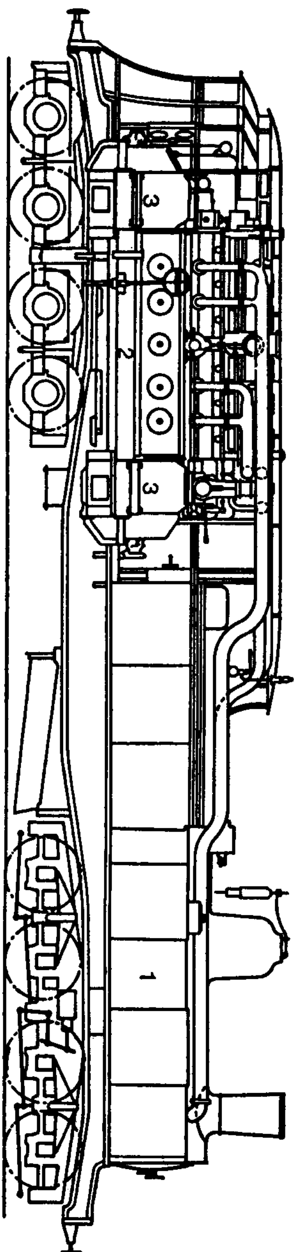
دربارهٔ کارهای هایلمان باید گفت که با ساخت دو مدل دیگر قویتر از اولی دنبال شدند. اما چنین می‌نماید که اندیشهٔ این مخترع کسانی زیادی را علاقه‌مند نساخت. با وجود موفقیت بسیار کوتاهی که موشک هایلمان به‌دست آورده بود در مدت اندکی به تاریخ سپرده شد. انتقال برقی حرکت از منبع انرژی متصل به آکسلهای لوکوموتیو، تا مدتها بعد تقلید نشد و آن‌هم در زمانی بود که کاربرد موتورهای دیزل در ترنها تازه شروع شده بود، یعنی پایان سالهای ۱۹۳۰، سپس، سی سال بعد، در توربینهای گازی.

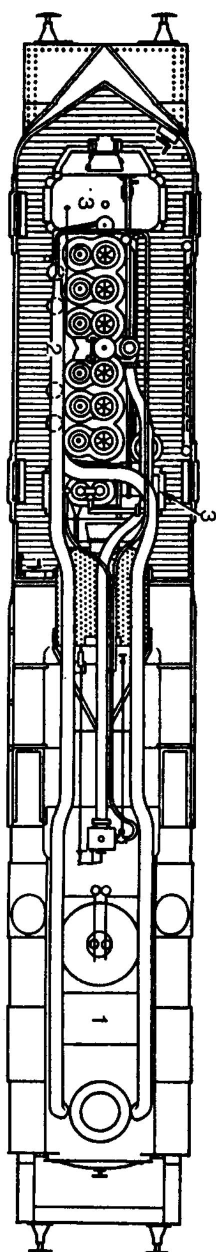
در همان دوره، علاوه‌بر کار منفرد هایلمان، پس از لوکوموتیوهای برقی کوچک مانوری، نخستین لوکوموتیوهای پرقدرت، ویژه خطوط بزرگ، برای کاربردهای صنعتی یا خطوط فرعی با ترنهای سبک به میدان آمدند.

آغاز سیاست برقی کردن: در سال ۱۸۹۵ شرکت جنرال‌الکتریک لوکوموتیوی با ۹۰ تن وزن برای راه آهن بالتیمور و اوهایو ساخت، این لوکوموتیو هنوز یک استثناست (شکل ۷۰). شرکت وستینگهاوس با همکاری شرکت بالدوین، که در اصل در اوایل سالهای ۱۸۳۰ لوکوموتیوهای امریکایی بخاری می‌ساخت، در همان اوان چندین لوکوموتیو با انتقال چرخدنده‌ای حرکت به بازار آورد؛ تا برای قطارهای باری سریع مورد استفاده قرار گیرند. بین انواع این لوکوموتیوها تفاوت چندانی وجود نداشت، جز اینکه قدرت موتور لوکوموتیوهای چرخدنده‌ای بسیار کمتر بود. وزن لوکوموتیوها برای قطارهای باری در صورت نیاز می‌توانست با بارهای جرم تعادل افزایش یابد. بعضی از این مدلها را آقای اسپراگ بررسی کرد و با همکاری دانکن[1] و هاچینسن[2] به رقابت آنها برخاست (شکل ۷۱).

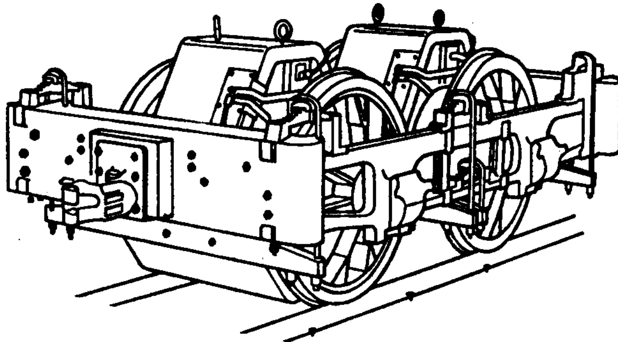
در اروپا، کشش با برق در شبکه‌های بزرگ، تنها پس از تغییر سده انجام گرفت. موفقیت

1. Duncan 2. Hutchinson



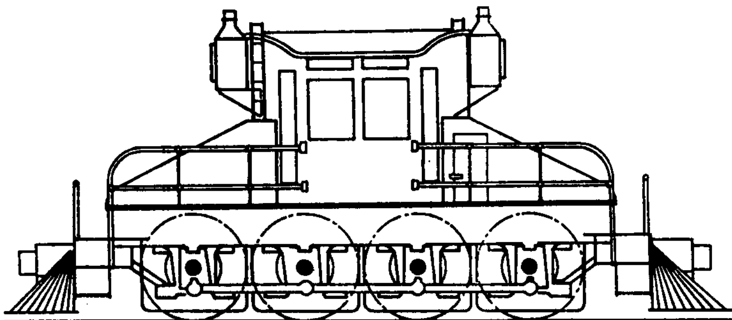


شکل ۶۹. لوکوموتیو هایلمان با ماشین بخار و مولد برق.
۱. دیگ بخار مشابه دیگ بخار لوکوموتیوهای بخاری معمولی؛
۲. ماشین بخار تندکار با سیلندرهای عمودی در یک خط، توزیع بخار بوسیلهٔ کشوی پیستونی؛ ۳. دو مولد برق که در انتهای دستهٔ موتورهای برقی، روی محورهای بوجیها سوار شده‌اند (شافتهایی که روی بوجی جلو و بوجی ترمز نشان داده شده‌اند).



شکل ۷۰.موتور بوجی‌دار لوکوموتیوهای راه‌آهن بالتیمور ـ اوهایو.
هر آکسل حامل یک موتور برقی است که محور آن در هر سر خود یک قطعهٔ پنج شاخه دارد که در نزدیکی طوقه بین پره‌های چرخها درگیر شده‌اند. انعطاف‌پذیری اتصالات با توپیهای کائوچویی تأمین شده است. هر لوکوموتیو دو بوجی دارد.

تراموا‌ها با پیدایش نیاز پنهانی در شهرنشینان ارتباط داشت. رفتار تکنسین‌ها در اواخر سدهٔ ۱۹ در مورد کشش برقی در شبکه‌های بزرگ راههای دور با حزم بسیار همراه بود. این کار به عقیدهٔ آنها حکم یک مسکن را داشت، همراه با مانور در ایستگاه، تونلهای طویل، و شیبهای تند. در فرانسه در سالهای ۱۸۹۵ ـ ۱۸۹۸ چندین خط ویژهٔ کوهستان تأسیس شد که مشهورترین آنها، باز هم خط



شکل ۷۱.لوکوموتیو برقی اسپراگ، ساخت بالدوین و وستینگهاوس.
چهار آکسل دارد که هر یک مجهز به یک موتور است.

در شامونیکس[1] در ایالت اوت ـ ساووا بود. این خط بعدها تا مرزهای Fayet-Saint-Gervais سویس ادامه یافت و در آنجا با خط شاتلار[2] متصل شد. یک راه‌آهن برقی صفحه دنده‌ای، حومهٔ شهر ژنو را در سال ۱۸۹۲ به قلهٔ کوه سالو[3] متصل ساخت. در کشورهای دیگر، اتصال فلورانس به فیزوله[4] در ایتالیا در سال ۱۸۹۱، و لوکوموتیو قله‌پیمای گورنرگرا[5] در سویس، لوکوموتیو یونگفرائو[6] که در سال ۱۹۰۲ ساخته شد توان برق را در گذشتن از شیبهایی که غالباً از عهدهٔ خودروهای دیگر ساخته نبود، نشان داد. همهٔ اینها کارهایی بودند که سازندگان آنها حق داشتند سرفراز و محبوب مردم باشند.

اما مهندسان الکترومکانیک این نسل، تصور نمی‌کردند که برق بتواند مسیرهای طولانی را بپیماید. آقای آندره بلوندل که در سال ۱۸۹۸ این نظر را داشت که کشش با برق محدود به مسافتهای کوچک است، نظر آقای اسپراگ در سال ۱۸۹۵ را نقل می‌کند که گفته بود: برق نتوانسته است ناقوس مرگ لوکوموتیوهای بخاری را به صدا درآورد، همان‌طورکه دینام، ناقوس مرگ ماشین بخار ثابت را به صدا درنیاورد». در ۱۸۹۵ به نظر اسپراگ، ماشین بخار ثابت، هنوز یک ماشین پیستوندار بود. این ناقوس برای مرگ لوکوموتیوهای بخاری به‌صدا درآمد، اما نیم سده پس از این تاریخ.

اما هنوز از انتشار کتاب بلوندل، بسختی پانزده سال گذشته بود که آزمایشی مخالف پیش‌بینی وی آماده شد. تعمیم کشش با برق، لااقل برای خطوط حومه و بعضی خطوط دور، منجر به ایجاد ترمینالهایی در چند شهر بزرگ شد که به حق در آن زمان به‌عنوان کارهای چشمگیر شهرت یافتند. یکی از موفقترین آنها، ایستگاه اوسترلیتز در پاریس بود. که راههای آن بمناسبت نمایشگاه سال ۱۹۰۰ تا ایستگاه اورسه ادامه یافتند. بعضی از راه‌حلهای مورد استفاده، در یکی از نخستین ایستگاههای بزرگ زیرزمینی نیویورک، Penn' Station اقتباس شدند.

هنوز چندی نگذشته بود که تجهیز Grand Central Station همان شهر، امکانات ترافیک فشردهٔ حومه و خطوط بزرگ را به یاری برق بخوبی ثابت کرد، بویژه امکان فرمان از دور موتورهای کششی تک اطاقی که در یکی از دو سر قطار جاسازی می‌شدند کار را تا اندازه‌ای ساده کرد؛ و با حذف مانور لوکوموتیو، سرعت تازه‌ای به‌کار داد. چنین مزایایی که برای متروی پاریس، در ابتدای کار پیش‌بینی نشده بود، در اینجا بسرعت به‌کار گرفته شدند.

توزیع نیروی محرکه روی چند آکسل، که موفقیت راه‌آهن کوهستانی را تضمین کرد، بوسیلهٔ عواملی که کشش را تقویت می‌کردند ـ کاری که به سود قطارهای باری نیز بود ـ راه‌اندازی و

1. Chamonix 2. Chatelard 3. Saléve 4. Fiesole 5. Gornergrat 6. Jungfrau

شتابگیری سریع ترن را نیز ممکن ساخت. مکانیسم شتابگیری نیز آسانتر شد و بعدها سرعتهای تجارتی قطارهای با مقصد دور با انعطاف بیشتری افزایش می‌یافتند. ضمناً باید در نظر گرفت که خود این موتور برقی در آن زمان بسرعتهای بسیار بیشتر از موتور بخاری دست یافته بود.

تجهیزات برقی راه‌آهنها در آغاز تکیهٔ زیادی به ریلهای مجزای حامل جریان، مستقر در کنار راه داشتند. این وسیله بدون اینکه انحصاری باشد طی چند سال چنان رواجی یافت که استفاده از کشش برقی برای مسافتهای زیاد به کابلهای برقداری محول شد که دکلها یا پلها با دخالت پانتوگراف آنها را حمل می‌کردند؛ و این روشی بود که با هزینهٔ بسیار کم، خط تغذیه را برقرار کرده بود.

تحولات بزرگ تکنیک: برقی کردن شبکه‌های بزرگ اروپا نیز مانند ممالک متحدهٔ امریکا در برههٔ سالهای ۱۹۰۰ تا ۱۹۱۰ آغاز به شکفتن کرد. در فرانسه، خطوط برقی شده پیش از جنگ جهانی اول: خط پاریس ـ ژوویزی[1] با جریان مستقیم ۶۰۰ ولتی، سپس پاریس ـ ویرزون[2] با جریان مستقیم ۱۵۰۰ ولتی روی شبکهٔ پاریس ـ اورلئان بود. شرکت میدی نیز برقی کردن خط مرکز نوسارگ[3] در بزیه[4] را انجام داد. باز همین شرکت است که کار برقی کردن شبکهٔ خود را در دورهٔ بین دو جنگ فعالانه به پیش برد. شبکهٔ l' État برقی کردن خطهای خود در حومهٔ پاریس را در سالهای ۱۹۱۰ انجام داد.

گرایش به افزایش ولتاژ تغذیه در این دوران مشهور است. از ولتاژ توزیعی در شهر با جریان مستقیم ۵۰۰ یا ۶۰۰ ولت به ولتاژهای ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ و سپس به ۲۴۰۰ روی آوردند. تغذیه تکفازی با ولتاژ بالا (۶۰۰۰ ولت در لیون)، با کاهش بسامد به ۱۵ یا ۲/۳ و ۱۶ دور (۱/۳ بسامد ۵۰) همراه بود، درحالی‌که در ممالک متحدهٔ امریکا از بسامد ۲۵ دور استفاده می‌شد.

از تجهیزات بسیار جالب اروپا می‌توان از تجهیزات ایتالیا در سالهای ۱۹۰۲ و ۱۹۰۴ برای کارهای بندر جنوا و نیز اتصال مودان[5] به تورینو نام برد. مهندسان ایتالیایی که در آن زمان پیشاهنگان بسیار نوآوری در کار کشش با برق بودند از جریان سه فاز و موتورهای ناهمزمان (آسنکرون) استفاده می‌کردند. شرکت براون ـ باوری، به‌طوری‌که دیدیم، در سال ۱۸۹۶ نمونه‌ای از این طرز کار را در مورد یک خط ترامواى در لوگانو[6] با جریانهای ۴۰۰ ولت و بسامد ۴۰ دور عمل کرده بود. تجهیز خطوط ایتالیا با جریانهای سه‌فاز و ولتاژ ۳۷۰۰ و بسامد کاهش یافتهٔ ۱۶ دور انجام گرفت. لوکوموتیوهای با پنج محور حرکت‌دهندهٔ زوجی چسبندگی محکمی روی ریلها داشتند و وزن آنها برای هر اسب قدرت، بسیار کمتر از دیگر لوکوموتیوهای آن عصر بود (۳۰ کیلوگرم در برابر ۸۰ کیلوگرم لوکوموتیوهای

1. Juvisy 2. Vierzon 3. Neussargue 4. Béziers 5. Modane 6. Lugano

امریکایی).

در چنین موقعیتی بود که در ایتالیا در پرتو نیرویی که برای روبه‌راه کردن صنعت دارای کیفیت عالی و ساختن نیروگاههای برق آماده شده بود، حماسه‌های بزرگی از صنعتی شدن به‌وقوع پیوست.

جریان سه‌فاز، بعداً جهت کشش با برق کاربرد زیادی نیافت. ویژگیهای راه‌اندازی و نحوهٔ کار موتورهای ناهمزمان و نیز پیچیدگیهای مربوط به گرفتن جریان بوسیلهٔ لوکوموتیوها، دو کابل هوایی و یک ریل، مانع از رواج آن شد.

برقی کردن مستقیم با جریان صنعتی: برنامه‌های برقی کردن شبکه‌های بزرگ در این دورهٔ بین دو جنگ، در اروپا به پیش برده شد. در فرانسه، در ۱۹۲۰ برای یکی کردن ولتاژ جریان مستقیم به ۱۵۰۰ ولت تصمیم گرفته شد. همین سیاست است که منظماً ادامه یافت تا اینکه در سال ۱۹۵۲ شرکت ملی راه‌آهن (SNCF)، به تجهیز خطوط تغذیه مستقیماً با جریان صنعتی تکفاز با ولتاژ ۲۵۰۰۰ و بسامد ۵۰ دور اقدام کرد. نوآوری اخیر بزرگترین موفقیت مهندسان SNCF و چندین مؤسسه بزرگ فرانسه و سویس بود که برپایهٔ یک طرح و انجام دادن یک کار همکاری می‌کردند.

برای به‌کارگرفتن لوکوموتیوهای جدید جریان تکفاز با ولتاژ ۲۵۰۰۰ ولت، راه‌حلهای گوناگونی بررسی شدند. تغییر شکل این جریان و کاهش ولتاژ، به کمک تجهیزات خاصی، که تغییرات زیر را ممکن ساختند، انجام گرفت: تبدیل جریان صنعتی به جریان مستقیم یا جریان سه‌فاز، پایین آوردن ولتاژ جریان تکفاز به ۳۶۰ ولت، یا بالاخره تبدیل به جریان تحمیل (مدول) شد. برای موتور کششی با جریان مستقیم.

دو روش نخست تبدیل برای دو ردیف لوکوموتیوهای CC ویژه کشش ترنهای باری سنگین روی یک خط آهن که در منطقه‌ای با صنعت متراکم فعال بودند به‌کار گرفته شدند. این تبدیل بوسیلهٔ گروههای کارشناس در هر دو مورد انجام گرفت.

برای تبدیل جریان تکفاز ۲۵ کیلو ولتی به جریان مستقیم، این تجهیزات شامل یک ترانسفورماتور تغذیه‌کنندهٔ یک موتور همزمان بود که دو دینام جریان مستقیم را فعال می‌ساخت. اینها مولدهای برق موتورهای کشنده بودند. برای تغییر شکل آن به سه‌فاز، ترانسفورماتور پایین‌آورندهٔ ولتاژ، یک تبدیلگر فازها را تغذیه می‌کرد و بدین‌ترتیب، جریان سه‌فازی با همان بسامد ایجاد می‌شد. سپس یک تبدیلگر فرکانس عمل می‌کرد. سرعت موتورهای کششی، با تغییر بسامد سه فازی که موتورها را تغذیه می‌کرد کم‌وزیاد می‌شد.

دو روش دیگر تبدیل بر روی دو ردیف لوکوموتیو BB عملی شده است. این لوکوموتیوها برای

ترنهای مسافری و سریع‌السیر ساخته شده بودند. یکی از آنها موتورهای تکفاز داشت که با توجه مخصوصی برای تأمین کارهای محوله بررسی شده بود و جریانی با فرکانس ۵۰ هرتز بوسیلهٔ یک ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ، آن را تغذیه می‌کرد. در مورد ردیف مجهز به موتورهای با جریان مستقیم، از یک ترانسفورماتور و نوعی یکسوی‌کنندهٔ جریان، با بخار جیوه، که مخصوصاً برای این کار ساخته شده بود و بعدها با نام ایگنیترون شهرتی به‌هم رساند استفاده شده است.

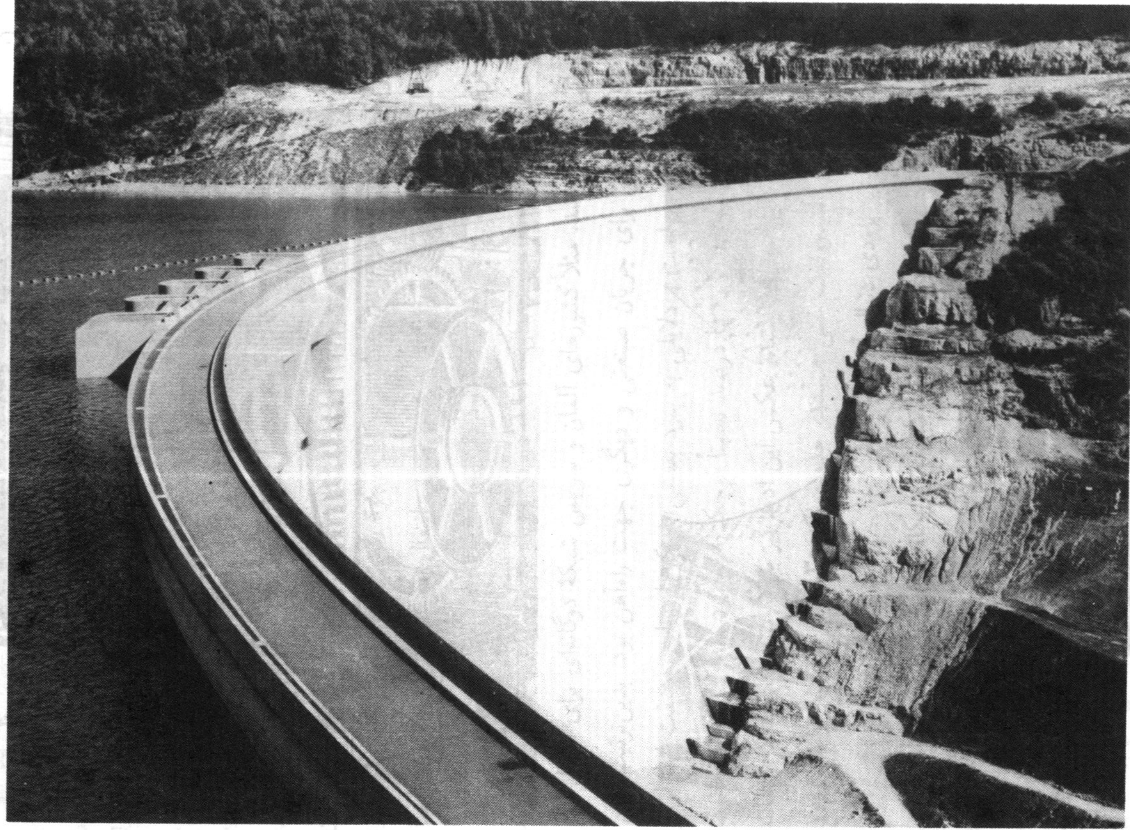
پس از بررسیهایی که در اوایل سالهای ۵۰ روی خطی که از آنسی[1] (اوت ـ ساووا) می‌گذشت انجام گرفت در سال ۱۹۵۲ تصمیم گرفته شد که خط نور[2] که حوضه‌های زغال‌سنگ والنسیین را به منطقهٔ فلزگری ـ تیونویل[3] متصل می‌سازد با جریان صنعتی برقی شود و این کار در سال ۱۹۵۵ به پایان رسید. پس از این تاریخ همین نوع برقی کردن در مناطق شمال و مشرق فرانسه، که برقی کردن با جریان مستقیم ۱۵۰۰ ولتی به‌کار گرفته نشده بود گسترش یافت.

راه‌آهن فرانسه و شبکه‌های بین‌المللی: شرکت ملی راه‌آهن فرانسه نوع دیگری تغذیه لوکوموتیوهای برقی را ایجاد کرد که انعطاف‌پذیری آن می‌توانست به شرایط گوناگون کاری پاسخ دهد؛ علاوه‌برآن، روابط گوناگونی نیز میان توزیع جریان برای کشش برقی و شبکه‌های انتقال جریان صنعتی برقرار شد.

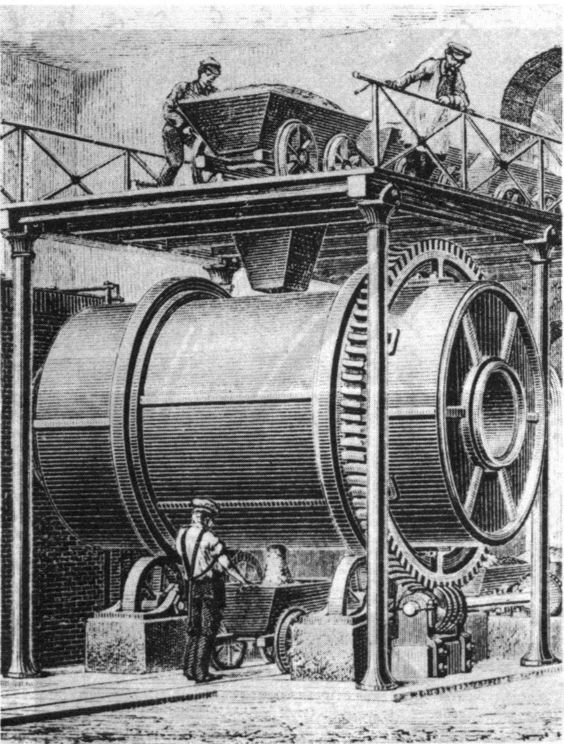
از این نقطه نظر، از حدود سی سال پیش، نوعی تحول بی‌برگشت نسبت به اوضاع و احوال اوایل این سده آغاز شده بود. مشکل تولید انرژی برقی برای راه‌آهن، نخست به شکل بسیار ابتدایی حل شد. هر خط برقی شده، شبکهٔ توزیع خود را داشت و این شبکه از کارخانه‌های خاص خود که به شرکت مالک خط تعلق داشتند تغذیه می‌شد. از آنجا که مسافتها نسبتاً کوتاه بودند تجهیزات شبکه‌های محلی برق بار زیادی نداشتند و تولید به سهولت با مقدار مصرف متناسب می‌شد.

در فرانسه، Compagnie d' Orléans نخستین شرکتی بود که بر آن شد تا شبکهٔ انتقال برق خود را با شبکه‌های صنعتی موجود مرتبط سازد و این در زمانی بود که آن شرکت برقی کردن خط آهن پاریس ـ ویرزون را به پایان برده بود. این گرایش اولیه پس از جنگ جهانی اول، که گسترش سریع تولید و انتقال انرژی برق، برای فراورده‌های جنگی، الکترومتالورژی و الکتروشیمی به فرانسه تحمیل شد، عمومیت یافت. تغذیهٔ راه‌آهنهای برقی با انشعاب شبکه‌های صنعتی در شماری از نواحی که در آنجاها انشعابات بسیار متراکم بودند عملی می‌شد. اما در نواحی دیگری در مرکز و جنوب فرانسه، ارتباطات این‌چنین نبود. نخست شرکت اورلئان و سپس شرکت میدی در نواحی کوهستانی که مراکز هیدرولیک تأسیس می‌کردند و ناگزیر به سرمایه‌گذاری هنگفتی شده بودند،

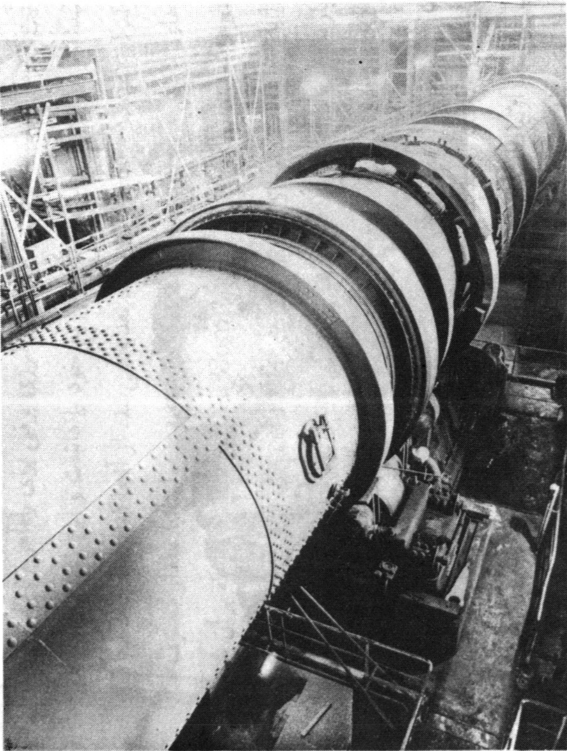
1. Annecy 2. Nord 3. Thionville



تابلوی ۱۹. سد ووگلان در ژورا، فرانسه (۱۹۷۰).



تابلوی ۲۰. کورهٔ گردان صنایع شیمیایی (۱۸۸۰)؛ برای ساخت کربنات سدیم).



تابلوی ۲۰ مکرر. کورهٔ گردان صنایع شیمیایی (۱۹۶۵)؛ برای
تسوئه پیریت.

ظرفیت تولید بسیار بیشتر از نیازهای راه‌آهن بود. سازمانهای مختلف تولیدی و نیز توزیعی برای تعمیم روابط درونی بین خود، اتحادیه‌ای تشکیل دادند. بدین ترتیب، استهلاک تجهیزات می‌توانست به طرز رضایتبخشی تأمین شود.

نقشی که شرکت میدی در سالهای ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ ایفا کرد در برقی کردن کل نواحی تحت پوشش، اهمیت باز هم بیشتری داشت. در زمان جنگ جهانی اول این شرکت، کارخانه‌های هیدروالکتریکی خود را برای تبدیل تولید آن از جریان تکفاز ۲/۳ و ۱۶ هرتزی به جریان سه فاز ۵۰ هرتزی تغییر شکل داد. زمانی‌که این شرکت برنامهٔ برقی کردن خود را به خطوط بوردو، تولوز، ست[1] توسعه داد در پیرنه خود را در برابر تعدادی از شرکتهای تولید برق یافت که شبکه‌های توزیع آنها هنوز توسعهٔ چندانی نیافته بودند. این شرکت حتی ساخت مجموعه‌ای از یک دو جین مراکز هیدروالکتریک را عهده‌دار شد و همهٔ تولیدکنندگان موجود را در یک اتحادیهٔ محلی گرد آورد. یک شبکهٔ ارتباطی از همهٔ کارخانه‌های این اتحادیه، گسترش انتقال جریان صنعتی را ممکن ساخت و پستهای فرعی این شرکت خط آهن را تغذیه کرد.

این خط‌مشی کلی که حدود سال ۱۹۲۰ در فرانسه اتخاذ شد، در آغاز از سوی کشورهای دیگر اروپایی پذیرفته نشد. مثلاً کشورهای آلمان و سویس شبکهٔ دوگانه‌ای برای انتقال انرژی برق تأسیس کردند که یکی برای جریان صنعتی و دیگری جهت راه‌آهن بود. بدین‌ترتیب، این مسأله بسیار مورد گفت‌وگو بوده است و دلایلی به سود بعضی شبکه‌ها بر این حقیقت استوار بودند که مصرف انرژی برای کشش با برق، تنها درصد نسبتاً کوچکی، (حدود ۷ تا ۱۰٪) از مصرف کل را تشکیل می‌دهد. این دلیل می‌تواند نشانهٔ عکس این ادعا نیز باشد. کشورهای دیگری مانند سوئد و نروژ که از نظر انرژی هیدرولیک غنی هستند، حدود سال ۱۹۳۰ به سیستم فرانسه روی آوردند و ایتالیا و مجارستان نیز بزودی دنبال آنها را گرفتند.

راه‌آهن برقی در ممالک متحده: در ممالک متحدهٔ امریکا، جنبش برقی کردن شبکه‌های بزرگ راه‌آهن، بسیار دیر شروع شد. کاربرد کشش با برق، تنها در موقعیتهای محلی بود: گذر از تونلهای طولانی و نفوذ در نیروگاههای مرکزی شهرهای بزرگ. تنها در سال ۱۹۳۲ بود که شرکت راه‌آهن پنسیلوانیا، برقی کردن خط نیویورک ـ واشینگتن را که به خود آن شرکت تعلق داشت شروع کرد. جریان برق کششی که تا آن زمان به‌کار گرفته می‌شد، جریان مستقیم و با فشار ۶۴۰ ولت، یا تکفاز، با فشار ۱۱۰۰۰ ولت بود. جریان تکفاز با فرکانس ۲۵ هرتز از شبکهٔ انتقالی صنعتی سه فاز را انطباق دادند.

1. Séte

دامنهٔ برقی کردن راه‌آهن امریکا هرگز قابل مقایسه با راه‌آهن اروپا نبوده است. در سال ۱۹۳۰ طول خطوط راه‌آهن در ممالک متحده ۳۰۰۰ کیلومتر بود و درحالی‌که در اروپا به ۷۵۰۰ کیلومتر می‌رسید. شرکتهای امریکایی که به تعداد زیادی از لوکوموتیوهای بخاری مجهز بودند که جنگ هیچ‌گونه زیانی به آنها وارد نساخته بود، در سالهای ۴۰ باز هم به کار سنتی و رکوردشکن ساخت این نوع لوکوموتیوها ادامه دادند و لوکوموتیوهای غول‌آسا و درخور عصری را می‌ساختند که به یکباره به پایان رسید. طی سالهای ۱۹۳۰ لوکوموتیوهای بزرگ دیزلی، کشش ترنهای مسافری در خطوط طویل را شروع کردند و روش دیزلی کردن پس از پایان جنگ جهانی دوم با سرعت دنبال شد. در این زمان طرحهای بزرگ برقی کردن رها شده بود. پانزده سال بعد، صنایع هواپیمایی و اتومبیل‌سازی، صنعت راه‌آهن ـ یعنی، همان صنعتی ـ که در سدهٔ پیش از آن، پرچم پیروزی غرب بود ـ را به رکود کشانیدند.

۵

گسترش بزرگ سدهٔ بیستم

مدتی کمتر از ۲۵ سال، رشتهٔ الکتروتکنیک متکی به تکنیکهای سست ماشینها گردان اولیه بود. این فرصتی بسیار کوتاه برای تشکیل یک تکنیک جدید پیشتاز بود. این سرعت نوآوری پیاپی، تنها برای چند نمونهٔ بسیار معدود وجود داشته است: توربینهای بخار، که در این زمینه هم وسایل تولید بخار بسیار پیشرفته بودند و هم موتورهای جدید برای راه‌انداختن مولدهای برق به‌موقع رسیدند. نیمرساناها هم در بخشهایی از تکنیک به‌کار گرفته شدند که گویا آنها را انتظار می‌کشیدند.

از میان همهٔ عواملی که این شگفتگی را ممکن ساختند، عاملی که تا کنون از آن کمتر یادشده است، تکنیک رسانیدن برق از محل تولید به محل مصرف بود. در واقع این کار زمانی پیش کشیده شد که نخستین ماشینهای الکترومغناطیسی هولمز و مالدرن[1] به‌کار افتادند. این تحول با پیشرفت تکنیک مولدها، که با آن، همراه و حتی آن را مشروط هم می‌کند از پا نایستاد.

1. Malderen

توزیع جریان برق

دیده شد که در چه اوضاع و احوالی نمایشهایی داده شد که ثابت می‌کرد که جریان مستقیم و نیز جریان متناوب را می‌توان به بهترین وضعی بمنظور انتقال انرژی به مسافتهای دور مورد استفاده قرار دارد. این نمایشها، که در اواخر سالهای ۱۸۸۰ هم هنوز در تصور نمی‌گنجیدند از عواملی بودند که همهٔ دورنمای کاربرد برق را تغییر شکل دادند.

در همان آغاز این دوره، جریان یک پیل یا ژنراتور الکترومغناطیسی را به گیرنده‌ای که تقریباً تنها از یک لامپ قوسی یا یک ظرف الکترولیز تشکیل می‌شد منتقل می‌کردند. این مدار بسیار کوتاه چند متری، تنها دو سیم بود که سرهای گیرنده را به الکترودها وصل می‌کرد. تغذیهٔ دستگاه که با یک مولد چند سرانجام می‌گرفت دشواریهای بسیار پیچیده‌ای ایجاد کرده بود که برای برطرف ساختن آنها باید چاره‌اندیشی می‌شد.

نخستین راهی که برای حل مشکل اندیشیده شد، در سال ۱۸۶۷، استفاده از یک موتور حرارتی، بخار و سپس گاز، برای گردانیدن چندین ماشین، مثلاً از نوع آلیانس بود که القاگیرهای آنها بر یک محور سوار شده بودند؛ و هر مولد، یک لامپ را تغذیه می‌کرد. زمانی‌که از دینامهایی استفاده شد، القاگرهای مربوطه را به‌طور زنجیری وصل کردند و تنها یک راه‌انداز که القاگیر آن را یک تسمه کمکی می‌گردانید، دینامها را تغذیه می‌کرد؛ بعد این راه‌انداز را ساده، و روی همان محور مشترک سوار کردند.

نخستین سیستمهای توزیع: پس از مدت کمی، در سال ۱۸۷۲، نخستین طرحهای «توزیع» ارائه شد. لامپهای قوسی به‌شکل چندتایی «همفشار» متصل شده بودند، که بعدها زنجیری اصطلاح شد و سیستمهای به‌کار رفته، متناسب با شکل جریان مورد مصرف، مستقیم یا متناوب بود، و شمار لامپهایی که تغذیه می‌شدند تغییر می‌کرد.

ماشین گرام، که پنج شعله نامیده می‌شد می‌توانست پنج لامپ قوسی با اتصال زنجیری را روشن کند. نیروی برق‌رانی آن ۲۵۰ ولت بود زیرا برای هر قوس می‌بایست ۴۰ تا ۵۰ ولت موجود باشد. وسیلهٔ خودکاری که آن را کوته‌مدار می‌کرد و چند نمونه از آن دیده شده است، مانع از آن بود که خرابی یک لامپ سبب خاموشی همهٔ آنها شود.

ماشینهای آقای براش و شرکت تامسن ـ هوستن که از امریکا بسرعت اروپا را تسخیر کرد برای برق‌رسانی تا ۶۰ لامپ با اتصال زنجیری طرحریزی شده بودند. نیروی برقرانی آنها بسیار بالاتر، ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ ولت بود. این ماشینها بدون کلکتور گرام بودند اما سیستم پیچیده‌تری داشتند

که امکان می‌داد در فشارهای بالای این دوره، بخوبی کار کنند. کمی بعد، توانستند که ماشینهای کلکتوردار با فشار بالا، نظیر ماشین وود بسازند که با ۲۶۴۰ ولت کار می‌کرد.

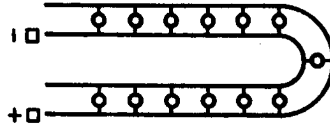
گستردگی این مدارها، توزیع واقعی را تأمین می‌کرد. در لندن توزیع برق در طول ۶ کیلومتر با دو مولد دارای اتصال زنجیری، هر یک با ۸۳۹ و در لحظهٔ شروع ۱۵۴۸ ولت انجام می‌گرفت که ۳۴ مرکز با آن تغذیه می‌شد.

روشن‌سازی اپرای پاریس بمناسبت نمایشگاه سال ۱۸۸۱ بوسیلهٔ ۳۸ مرکز تأمین شد که از تعدادی مولد براش مستقر در شان‌الیزه با خطی به طول ۱۲ کیلومتر تغذیه می‌شدند. ماشینهای تقسیم گرام و لونتن که جریان متناوب برای شمعهای یابلوچکوف تأمین می‌کردند نخستین دستگاههایی بودند که برای شروع کار مولد، توزیع را تأمین می‌کردند. روی هر یک از آنها قرقره‌های مستقر روی یک حلقهٔ بیرونی، هرکدام‌یک گروه پنج لامپی را تغذیه می‌کردند. مدل رایج ماشین گرام دارای هشت بخش چهار قسمتی بود که می‌توانستند به‌طور ولتاژی یا مقداری یعنی با اتصال زنجیری یا موازی به‌هم مربوط گردند. این دستگاه مانند مولد براش، ۶۰ لامپ را تغذیه می‌کرد اما خطی دو سیمی برای هر گروه پنج لامپی لازم بود که جمعاً دوازده خط می‌شد. بدین‌ترتیب، روشن می‌شود که گرام نخستین کسی است که سیستم چند فاز را تولید کرده است ـ ابتکاری که به‌حساب نیامده است.

توزیع با شدت ثابت: در هر جا که از تأسیسات براش اقتباس شده است، دغدغهٔ ثابت نگاهداشتن شدت جریانی که از یک مدار می‌گذرد وجود دارد. زمانی‌که یک لامپ کوته‌مدار می‌شود، باید ولتاژ را در آغاز خط به ۵۰ ولت پایین آورد، سپس هر زمان که لامپ به مدار بازگشت ولتاژ را بالا برد. نخستین تنظیمها با دست بود. بدین‌ترتیب که سرعت گردش ماشین بخار را تغییر می‌دادند.

زمانی‌که توانها روی به افزایش نهادند دستگاههای خودکاری طرحریزی شد، که دستگاه کابانلا را می‌توان نمونه‌ای از آنها دانست. این دستگاه ـ لااقل از نظر تئوری ـ یک شبکهٔ واقعی بود، زیرا چندین مولد که با اتصال زنجیری به یکدیگر کوپلاژ شده و ولتاژی برابر حداکثر ولتاژ لازم تولید می‌کردند به این دستگاه برق می‌رسانیدند. هر ماشین را می‌شد برحسب ضرورت وارد مدارکرد یا از آن خارج ساخت.

اما پس از اندک زمانی، از سال ۱۸۸۱، این دستگاه رفته‌رفته از دور خارج شد؛ با این‌حال، در موارد ویژه‌ای، مثلاً در سیستم رنه‌توری، که از آن سخن گفته‌ایم، در آغاز سدهٔ بیستم، برای انتقال جریان مستقیم، تا اندازه‌ای ارزش خود را نگاهداشته بود.



شکل ۷۲.حلقهٔ دپره؛ برای توزیع برق با ولتاژ ثابت.

توزیع با ولتاژ ثابت: پیدایش لامپهای فروزان نخستین سوان و ادیسن، انگیزه‌ای برای بررسی سیستمی از توزیع با ولتاژ ثابت شد. همهٔ دستگاههای گیرنده با اتصال موازی سوار می‌شدند، اما با شروع کار این سیستم، واقعاً می‌توان از کار توزیع، به‌معنای کنونی آن سخن گفت. دیگر مسألهٔ وارد کردن سیمهای دارای فشار قوی به درون خانه‌ها ـ که خطری برای مصرف‌کننده بود ـ وجود نداشت وانگهی افروزه‌ها شکننده بودند و توان پایداری در برابر تغییرات شدید ولتاژ، حول فشار اسمی را، که در ابتدا ۶۰، سپس بسیار سریع به ۱۱۰ ولت می‌رسید نداشتند. بنابراین، می‌بایست وسایلی برای «تنظیم ولتاژ» به نسبت بار الکتریکی اندیشید. برای این کار از «منحنیهای مشخصهٔ» آقای هاپکینسون استفاده کردند. این منحنیها چگونگی تأثیر متقابل عوامل گوناگون یک مولد: فشار، شدت، سرعت گردش القاگیر، جریان تحریک را بر یکدیگر نشان می‌دهند.

آقای هایرم ماکسیم توانست تنظیم ولتاژ را با یک آهنربای برقی عملی سازد که روی فنر زغال راه‌انداز دینام اصلی، که مجهز به یک تحریک مستقل بود اثر می‌گذاشت.

آقای مارسل دپره، در ابتدا برای راه‌اندازی دینام، ترکیبی از سیم‌پیچها به‌کار برد. سیم‌پیچی که با مدار اصلی خروجی، اتصال زنجیری داشت، مقدار تحریک تولید شده توسط یک سیم‌پیچ مستقل را تصحیح می‌کرد. وی بعداً سیستم بسیار کارآمدی از فیوز برق پیشنهاد کرد که در مقیاس بسیار بزرگی رواج یافت (شکل ۷۲). اگر انشعاب دادن لامپها روی یک خط دو سیمی را می‌پذیرفتند، یا افت ولتاژ در پایان خط بسیار زیاد می‌شد یا اینکه باید سیمهای بسیار ضخیم به‌کار برند. در سیستم دپره هر دو سیمی که از دینام می‌آمد. مدار تغذیه را به‌طور کامل مشخص می‌ساخت و «حلقه‌وار» به‌سوی دینام برمی‌گشت. بدین‌ترتیب، برای همهٔ لامپهای انشعابی بین این دو سیم، طول کلی مدار خط برابر باقی می‌ماند. بنابراین، کافی است که ولتاژ را در آغاز مولد به‌مقدار درخور تنظیم کرد و افت ولتاژ در همهٔ نقاط کاربرد بدون تغییر می‌ماند.

شبکهٔ ادیسن: ادیسن هم برای نخستین شبکهٔ خود سیستمی بسیار ابتدایی طرح کرده بود. وی کارگری را مراقب ولت‌سنج کرده بود تا رئوستایی را که روی راه‌انداز مولدها بود با دست تنظیم

۱. Characteristic Curve یک منحنی که رابطهٔ دو یا چند مقدار متغیر را با یکدیگر نشان می‌دهد.ـم.

کند؛ بدین‌ترتیب ولتاژ دینامها کنترل می‌شد. در این مورد هم روحیهٔ عملگری «جادوگر» منلو پارک مشهود است و در سایهٔ همین روحیه، وی سازندهٔ نخستین شبکهٔ توزیعی شد که شرح آن گذشت.

ادیسن فهمیده بود که برای پایین آوردن بهای تمام شدهٔ برقی که به مشتریان خود می‌فروشد باید از ژنراتورهای پرقدرت استفاده کند. یک ماشین ۱۵۰ اسبی می‌توانست یا ۱۰۰۰ لامپ ۱۶ شمعی یا ۲۰۰۰ لامپ ۸ شمعی را تغذیه کند.

لامپهای با افروزهٔ کربنی با منشأ گیاهی به‌علت تغییر مقاومت آن در اثر گرما، ۲۵۰ Ω در سرما و ۱۴۰ Ω (اومگا) در گرما، مشخصات کاری ظریفی داشتند. این پدیده هنوز توجیه نشده بود و مشکلات تازه‌ای ایجاد می‌کرد زیرا معکوس مشخصات افروزه‌های فلزی بود. در شرایط کاری دائمی، مولدی که ۱۰۰۰ لامپ را با فشار ۱۰۵ ولت تغذیه می‌کرد در گرما ۷۵۰ آمپر می‌داد که حدود ۸۰ کیلووات می‌شد. تنظیم سرعت گروه ژنراتورها و ولتاژ دینام، در صورت تغییر شدید بارها، کار دشواری بود.

ادیسن چندین دینام ۹۳ کیلوواتی ساخت که یک ماشین بخار ۱۲۵ اسبی آنها را می‌گرداند. وزن آنها ۱۷ تن، که ۱۰ تن وزن القاگر و ۲٫۵ تن وزن‌القاگیر بود. ادیسن در این کار خود هیچ نوآوری نداشت و اصولاً از دستگاههای گرام و زیمنس الهام گرفته بود. وی خشنود بود که وسایل معمول در ساخت دینامهای دوقطبی، بویژه القاگر و کفشکهای قطبهای آنها را کاملتر کرده است. آقای ادیسن، برای القاگر وسیله‌ای به‌کار گرفت که گرام آن را برای ماشینهای هشت‌گوش خود مورد استفاده قرار داده بود: هشت هسته که پنج عدد آنها روی کفشک بالایی و سه هسته دیگر روی کفشک پایینی قرار داشتند، هشت سیم‌پیچ که با چهار اتصال زنجیری به سرهای القاگیر وصل شده بودند. این رئوستا که با دست تنظیم می‌شد از ۳۰ مقاومت ۱۰۰ اومگایی (Ω) تشکیل شده بود. القاگیر آن که در هر دقیقه ۳۵۰ دور می‌گردید تا ۱۰۵ ولت بدهد بر پایهٔ مدل القاگیر طبلکی زیمنس بود اما مارک ادیسن بر خود داشت: استوانه‌ای چوبی که با واشرهای نازک آهنی که با کاغذ از یکدیگر عایق شده بودند، احاطه شده بود. تعداد ۱۳۸ میلهٔ فلزی با طولهای بیش از یک متر که القاگرهای فعال را تشکیل می‌دادند و روی ۶۰ دیسک مسی پیچ و مهره شده بودند اتصالهای جنبی را تأمین می‌کردند؛ سرانجام گرام با دو گروه هشت‌تایی جاروبک.

در مورد خطهای توزیع، که وی آنها را فیدر[1] می‌نامید ـ نامی که عموماً پذیرفته شد ـ ادیسن از سیستم کابلکشی زیرزمینی که آقای بروکس[2]، یکی از هموطنان وی در سال ۱۸۷۸ آن را به ثبت

۱. به‌معنای تغذیه کننده.ـم.

2. Brooks

رسانیده بود، الهام گرفت؛ کابلها با نخهای پنبه‌ای یا چتایی عایق می‌شدند و از لوله‌هایی آهنی پر از گریس، گذرانیده می‌شدند. ادیسن به‌عنوان کابل، میله‌های مسی به طول ۶ متر را به‌کار برد و سر و ته آنها را به یکدیگر متصل می‌ساخت. مخلوطی که لوله‌ها را پر می‌کرد شامل قیر، صمغ، پارافین و روغن بزرک بود. این مخلوط در حالت گرم با فشار به درون لوله، وارد می‌شد. مقطع سیمها متناسب با تعداد انشعاب در سرتاسر خط کاهش می‌یافت. در هر محل انشعاب جعبهٔ انشعابی از چدن گذاشته می‌شد تا سیم تغذیه که با نخ پنبه‌ای عایق شده بود بتواند خارج شود.

ادیسن دربارهٔ همه قطعات مدار اندیشیده بود، بعضی از این قطعات مثل سرپیچ لامپ و فیوزهای سربی هنوز هم رواج دارند. او هم‌چنین یک کنتور الکترولیزی اختراع کرده بود که با اتصال موازی در مدار گذاشته می‌شد و مقدار برق مصرف‌شده هر مشتری را با افزایش وزن صفحات مسی غوطه‌ور در محلولی از سولفات نشان می‌داد. ادیسن بسرعت این دستگاه را تکمیل کرد تا از زحمت توزین رها شوند. الکترودها با یک شاهین ترازو به‌طور متعادل آویزان بودند و یک سیستم خودکار در جهت عکس جریان، شاهین ترازو را به نوسان می‌آورد؛ این نوسان، سبب می‌شد که چرخدندهٔ گیرداری که عقربه‌ای را روی صفحه حرکت می‌داد به‌کار افتد.

رواج روشنایی با برق: موفقیت ادیسن چندان هم سریع نبود و با گذشت سالها، رفته‌رفته پس از گشایش نیروگاه پرل استریت مردم به وی روی‌آوردند. دو سال بعد، ۱۸۸۴، بیش از ۱۱۰۰۰ لامپ در ۵۰۰ خانه از این نیروگاه برق می‌گرفتند.

حریفان متعددی قد علم کردند. گرچه ادیسن هنوز انحصار ساخت لامپها را در دست داشت ـ انواع دیگر لامپهای این دوره پس از مدت کوتاهی کنار گذاشته شدند ـ ولی او نمی‌توانست مانع تأسیس شبکه‌های شرکتهای دیگران شود. یک کارخانهٔ هیدرو ـ الکتریک در سال ۱۸۸۲ در آپلتون[1] واقع در ویسکانسین تأسیس شد و پنج سال پس از آن، در ممالک متحدهٔ امریکا بیش از ۷۰۰ شرکت فعال بودند که نیروگاههای آنها با ماشینهای براش، وستون ـ ماکسیم، تامسن ـ هوستن تجهیز شده بودند. در همین سال ۵۵۰۰۰۰ لامپ افروزه‌ای و ۱۴۰۰۰۰ لامپ قوسی روشن می‌شدند.

تولید وسایل برقی ویژه روشنایی، بسرعت افزایش یافت. در سال ۱۸۸۷، کارخانهٔ براش ۵۰۰ کارگر داشت. در ۱۸۸۹ کارخانه تامسن ـ هوستن در بستن هر ماه ۱۸ دینام، ۴۰۰ لامپ قوسی و ۱۰۰۰۰ لامپ فروزان تولید می‌کرد. برای لامپهای قوسی در هر ماه ۴۵۵ کیلومتر میلهٔ زغالی می‌ساختند.

---
1. Appleton

ادیسن پس از آنکه با سوان شریک شد در اروپا شعباتی تأسیس کرد، در ایتالیا و فرانسه، در آن زمان شرکتهای محلی وجود داشتند. در آلمان در سال ۱۸۹۰ برای روشن کردن ۱۷۰۰۰۰ لامپ فروزان، ۴۰۰۰ دینام می‌گردیدند. این وسایل را زیمنس و آ. اِ. گ. تولید می‌کردند. نخستین کابلکشی برای برق در برلین و در سال ۱۸۸۶ انجام گرفت. شهرهای لایپزیگ، مونیخ، کولونی دارای شبکه‌های توزیع بودند.

در فرانسه، تنها از سال ۱۸۸۵ نخستین شبکهٔ واقعی توزیع در نواحی کوهستانی برقرار شد. نخستین کارخانهٔ هیدروالکتریک در بلگار ـ سور ـ والسرین[1] در ایالت ان تأسیس شد و پس از اندک مدتی ایالتهای بوفور ـ سور ـ دورون[2]، سن‌ژان ـ دو ـ مورین[3] در ایالت ساووا به‌دنبال آن رفتند. در سال ۱۸۸۶ شهر سنت ـ اتین با شرکت کنتینانتال ادیسن[4] برای توزیع جریان برق مستقیم قراردادی بست وکمی پس از آن شهر تور برای توزیع جریان متناوب همراه با ترانسفورماتوری که ولتاژ را از ۸۲۵ به ۵۰ ولت پایین می‌آورد تأسیساتی برپا داشت. شهر پاریس در سال ۱۸۸۹ به‌مناسبت چهارمین نمایشگاه عمومی دست به‌کار روشن‌سازی با برق هم برای خانه‌ها و هم جهت خیابانها و مؤسسات ملی شد.

در پاریس هم‌مانند دیگر شهرهای بزرگ تأسیساتی کم‌وبیش پراکنده پدید آمدند. پس از روشن‌سازی خیابان اپرا و میدان تئاتر فرانسه با شمعهای یابلوچکوف در سال ۱۸۷۸، یک کلاه فرنگی در آل[5] و میدان باستیل در مدتی بیش از یک سال، ۱۸۷۹ ـ ۱۸۸۰ از همین تأسیسات استفاده کردند. سپس آقای لونتن مأمور روشن‌سازی میدان کاروزل و کاخ لوور بوسیلهٔ رگولاتورهای تولیدی خود شد. برای روشنایی پارک مونسو[6]، در ۱۸۸۲، شمعهای یابلوچکوف به‌کار گرفته شد و برای بوت ـ شومون[7]، در ۱۸۸۴، لامپهای براش. در همهٔ تأسیسات توزیعی که از آن یاد شده است، عملیات محدودی انجام گرفته بود.

می‌توان تصور کرد که این ادعا که دینام تا آن زمان هنوز منابع شیمیایی برق را به‌طور قطعی تسخیر نکرده بود از نظر فنی، چقدر تردیدآمیز است. در سال ۱۸۸۲ مؤسسهٔ بااهمیت Comptoir d'Escompte پاریس تصمیم به پذیرفتن روشنایی برقی گرفت اما به‌عنوان منبع تغذیه، پیلهای بیکرومات همراه با یک ماشین بخار برای فعال کردن دینام را انتخاب کرد، که آن را بسیار گران می‌دانستند. تأسیسات باتریهای پیلها همه زیر زمین را اشغال کرده بودند. یک سیستم مکانیکی معمولی می‌توانست همهٔ الکترودهای روی را بالا ببرد تا در ساعتهای غیرفعال، فرسایش نداشته

1. Bellegard-sur-Valserine 2. Beaufort-sur-Doron 3. Saint-Jean-de-Mourienne
4. Compagnie Continental Edison 5. Halles 6. Monceau 7. Buttes-Chaumont

باشند. وانگهی توزیع محلول بیکرومات به توسط یک مخزن و یک موتور گازی، که کمپرسوری را برای جریان دادن هوا در همهٔ پیلها، بمنظور جلوگیری از رسوب اکسید کروم فعال می‌کرد، انجام می‌گرفت. گویا پس از مدتی آشکار شد که این توجه برای صرفه‌جویی مستقیم، بیهوده بوده است.

نمایشهای آقای ادیسن در نمایشگاه برق ۱۸۸۱ اطلاعات مربوط به این مسأله را دقیق‌تر کرد. شهرداری پاریس در سال ۱۸۸۳ با لامپهای فروزان روشن شد. پس از اینکه آتش‌سوزی Opéra-Comique در ۱۸۸۷، شرکت میلده و کلرک[1] امتیاز تجهیز یک نیروگاه ۱۵۰۰ لامپی را برای روشن‌سازی تئاتر و حتی انتقال جریان برق با کابلهای هوایی، که از بالای بامها کشیده می‌شد به‌دست آوردند.

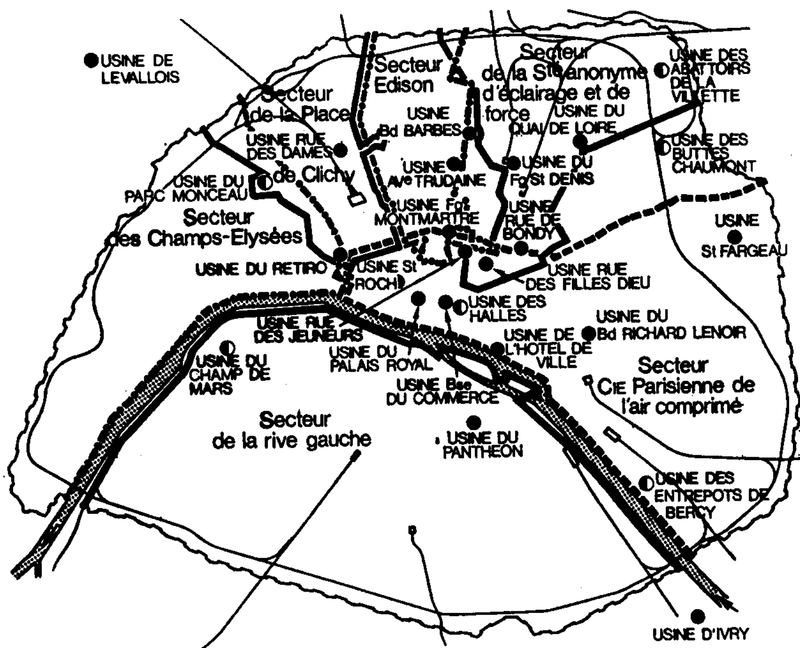
به‌دنبال این آتش‌سوزی بود که شهر، موضوع سازمان دادن روشن‌سازی اماکن عمومی و خصوصی با برق را مورد بررسی قرار داد. کارکنان و مشاوران، چندین پیشنهاد جهت مناقصه را دریافت کردند که براساس سیستمهای گوناگونی استوار شده بودند. چون هیچ دلیل فنی برای ترجیح یکی بر دیگری نبود هیئت رئیسه بر آن شد که جملگی را آزمایش کند و برای این کار، مجتمع را به چند بخش تقسیم کرد و هر بخش را به یک شرکت واگذاشت.

بخشهای پاریس: ابعاد بخشها و شکل آنها بستگی به تراکم مشتریان داشت. همهٔ کنارهٔ راست رودخانهٔ سن به پنج بخش تقسیم می‌شد. این بخشها به‌شکل ستاره با اضلاع نابرابر بودند و گاهی درهم می‌رفتند. رئوس این اضلاع متوجه محله‌هایی از بولوارهای بزرگ بود که مغازه‌ها و تئاترها در آنها زیاد بودند. ایستگاه راه‌آهن نورد (شمال) برای یکی از این بخشها، محل درآمد خوبی شده بود و کمبود مشتری خصوصی در محله‌های فقیرنشین شمال‌شرقی پاریس را جبران می‌کرد (شکل ۷۳).

به‌طورکلی، توزیع برق با جریان مستقیم و فشار ۱۱۰ تا ۱۲۵ ولت انجام می‌گرفت. شرکت کنتیناتتال ادیسن که بخش آن کوچک ولی جای خوبی بود در خیابان فوبور- مونمارتر[2] علاوه‌بر جریان مستقیم ۱۱۰ ولت، جریان متناوب ۲۰۰۰ ولت هم تولید می‌کرد و از آنها برای روشنایی کاخ الیزه[3]، که محلی برای مجالس رقص و جشنها (مسافت دوکیلومتر) بود استفاده کرد. ترانسفورماتوری در محل، ولتاژ را به ۱۱۰ پایین می‌آورد. شرکتهای متعددی بوسیلهٔ کابلهای تغذیه (فیدر) جریان مستقیم ۳۰۰۰ ولتی که کموتاتوری آن را به ۱۱۰ کاهش می‌داد، برق را توزیع می‌کردند.

توزیع برق با دو، سه یا پنج سیم با سیستمهای گوناگونی از تنظیم فشار بین سیمها به دینامهایی که برحسب مأموریت نقش گیرنده یا دهندهٔ برق را داشتند انجام می‌گرفت. گاهی همین تنظیم را

1. Mildé et Clerc 2. Faubourg-Montmartre 3. Palais de lÉlysée



شکل ۷۳.نقشهٔ بخشهای نخستین توزیع برق در پاریس.
کارخانه‌های برق بخشها با نقاط سیاه نمایانده شده‌اند؛ کارخانه‌های برق شهرداری با دایره‌های سیاه و سفید.

باتریهای انباره‌ای که بین فیدرها همچون دینام مرتب شده بودند تأمین می‌کردند. وانگهی کاربرد انباره‌ها در همهٔ کارخانه‌های دارای جریان مستقیم تقریباً عمومیت داشت تا برق را در ساعتهای خالی انبار کنند و در زمانهای بسیار پُر مصرف بتوانند از عهده پاسخگویی برآیند.

وسایلی که برای تولید به‌کار گرفته می‌شد بسیار گوناگون بود. حتی در یک شرکت و حتی در یک کارخانه به مقاطعه‌کارهای مختلف مراجعه می‌شد زیرا این تجهیزات می‌بایست طی دو یا سه سال ساخته می‌شدند و یک ماشین‌ساز نمی‌توانست کل اقلام لازم را در فرصتی چنین اندک تهیه کند. در مورد موتورها هم که انواعی از ماشینهای بخار بودند، جز پنج موتور یکی از کارخانه‌ها، در جاهای دیگر، همین وضع برقرار بود. بیشتر کارخانه‌ها در پاریس بودند، و بعضی، در مرکز محله‌های شلوغ قرار داشتند. بیشتر آنها پستهای فرعی یا ترانسفورماتور بودند. تنها دو کارخانه در حومه بودند:

یکی در سنت ـ اوئن[1] که جریان مستقیم با ۲۴۰۰ ولت برای شرکت روشنایی و نیرو با سهامی عام تولید می‌کرد و همهٔ کارخانه‌های آن، تنها یک شبکه کامل را تشکیل می‌دادند. کارخانه دیگر در لوالوا ـ پره[2] که جریان متناوب با فشار ۳۰۰۰ ولت تهیه می‌کرد که ولتاژ آن در خانه‌های بخش اعیان‌نشین شان ـ الیزه به ۱۱۰ ولت پایین می‌آمد.

ساحل چپ، تنها یک بخش محروم را تشکیل می‌داد که محله‌های بولوارهای سن میشل و سن ژرمن تقریباً تنها محله‌هایی بودند که شرکت مربوط، به آنها چشم داشت. توزیع برق با جریان متناوب ۳۰۰۰ ولتی از تنها کارخانهٔ ایوری[3] انجام می‌گرفت.

همچنین باید گفت که سیمهای توزیع برق در پاریس به‌علت وجود یک کارخانهٔ متعلق به شهرداری که در یک کلاه‌فرنگی واقع در آل بود و محله‌های این ناحیه را با جریان مستقیم و محله‌های اپرا در پون‌نف با جریان متناوب ۲۴۰۰ ولتی روشن می‌کرد، بسیار درهم شده بود. برای روشن‌سازی فروشگاههای بزرگ، لوور، بون مارشه، پرنتان و تعدادی گراند هتل، همچنین برای روشنایی همه ایستگاههای راه‌آهن، جز ایستگاه نورد، شمار زیادی کارخانه‌های خصوصی برق وجود داشت.

نیروی محرکهٔ صنعتی: در همهٔ شهرهای بزرگی که توزیع برق اجرا می‌شد، تفصیلاتی از همین نوع جریان داشت. روشن‌سازی، عامل اصلی تأسیس نخستین شبکه‌های توزیع بوده است. در همان دوران، تراموای‌های برقی هم بتدریج راه افتادند؛ اما هر شرکت حمل‌ونقل، از همان آغاز کار، مجهز به یک کارخانهٔ برق و خطوط توزیع مخصوص به خود بود. این وضع چندین دهه استمرار داشت. مدتهای طولانی، برق صنعتی کارگاههای تولیدی موجود در شهر یا حومهٔ آن، از شبکه‌های شرکتهای روشنایی دارندهٔ امتیاز، گرفته نمی‌شد. این نیرو در همان کارگاهها به توسط ماشینهای بخار، که محورهای انتقال حرکت را می‌گردانیدند، یا به توسط موتورهای گازی، که لااقل در شهر پاریس از سالهای ۱۸۸۰ کارگاههای کوچک از آنها استقبال می‌کردند، تولید می‌شد. کارخانه‌های بزرگ از هر دو منبع انرژی استفاده می‌کردند، اما به‌طورکلی، دستگاههای گازساز خود را داشتند. این کارخانه‌ها برای برآورده ساختن نیازهای خود، برق تولید می‌کردند. همهٔ این تأسیسات موتورهای بخاری یا گازی، متضمن سرمایه‌گذاریهای هنگفتی بودند، مصالح محکمی داشتند و به‌طورکلی، مدتی بیش از نیم سده بخوبی کار کردند. از سوی دیگر باید گفت که هزینه تولید انرژی که مستقیماً از این ماشینها بوسیلهٔ موتورهای حرارتی (با هوای گرم) به‌دست می‌آمد بسیار ارزانتر از آن بود که پس از تبدیل به برق به‌کار می‌گرفتند. انشعاب روی شبکه‌های شرکتهای دارندهٔ امتیاز برق، از سوی

1. Saint-Ouen 2. Levallois-Perret 3. Jvry

رؤسای کارگاهها، تنها برای روشنایی کارگاهها و فروشگاهها پذیرفته می‌شد آن‌هم زمانی‌که نیروگاه خود را نداشتند.

بااین‌حال،تحول جغرافیایی صنایع پاریس، که حدود سال ۱۸۵۰ شتاب تازه‌ای یافت ـ شتابی که هنوز هم ادامه دارد ـ به سود پیشرفت در امر توزیع برق هم در محدودهٔ شهری و هم در حومه بود. تا آنجا که می‌توان تحلیل کرد، وضع چنین بود. در سالهای ۸۰ در محله‌های مرکزی شهر، دیگر هیچ کارگاه تولیدی یا تبدیلی مهمی نبود. صنعت پاریس جز در محله‌های غربی که اعیان‌نشین باقی مانده بودند، به اطراف آن منتقل شده بود. صنعت، در خارج از کمربندها، در حومهٔ پاریس، بویژه در شمال و جنوب‌شرقی متمرکز شده بود. این جابه‌جایی‌های صنعت، انگیزه توسعهٔ سریع روستاهای کوچک قدیمی شد؛ در همان حال حومه‌های دیگر، مثلاً در شمال‌غربی، تبدیل به مناطق مسکونی شدند و تراکم جمعیت در آنها متناسب با پیشرفت وسایل جابه‌جاسازی افزایش یافت. بیشتر این مناطق عاری از وسایل تولید و توزیع گاز روشنایی بودند که می‌توانست به نیازهای گوناگون خانه‌ها و کارگاهها بلاواسطه پاسخ دهد. حدود سال ۱۹۱۰ که کاربرد جریان سه فاز آغاز شد، کارگاههایی که بتازگی استقرار یافته بودند، یا درپی جابه‌جایی از یک محلهٔ پاریس به حومه، یا اینکه تازه تأسیس شده بودند نیروی محرکهٔ برقی خود را از تولیدکنندگان آن تقاضا کردند. بدین‌ترتیب، شرکتهای تازه‌ای برای تولید برق ایجاد شد و شبکه‌های توزیعی خود را با سهولتی بسیار بیش از آنچه که شرکتهای دارندهٔ امتیاز بخشهای پاریس در اختیار داشتند، توسعه دادند. کار توزیع برق به شکل بسیار درهمی تا آغاز جنگ جهانی اول به‌پیش رفت. این پدیده تا آنجا که به‌نظر می‌رسد، در همهٔ شهرهای بزرگ جهان، همین‌طور بوده است.

آغاز کاربرد برق به‌عنوان نیروی محرکه برای راه‌آهن، و نیز به‌عنوان وسیلهٔ کار صنایع شیمیایی و فلزکاری در مناطقی که جریانهای آب تأسیس نیروگاههای هیدروالکتریک را ممکن می‌ساخت، به مطالب بالا افزوده می‌شود. در فرانسه، تجهیزات هیدروالکتریکی، که پیشرفت آنها در اوایل این سده کند بود، طی جنگ جهانی اول، بسرعت توسعه یافت. این جنبش تا حدود سال ۱۹۶۰ از پا نایستاده است.

بهای روشنایی برق: بهای مصرفی برق مدتهای زیاد گرانتر از وسایل روشنایی بود. دیده شد که محله‌های فقیرنشین پاریس، با اینکه در بخشهای بعضی از دارندگان کارخانه‌های برق بودند تا مدتها از داشتن انشعاب محروم ماندند. روشنایی با برق برای خانه‌های شخصی تا پایان جنگ جهانی اول در بیشتر کشورهای جهان، یک تفنن بود.

آماری از سال ۱۹۱۰ مقایسه‌های زیر را به‌دست می‌دهد:

- یک لامپ ۱۶ شمعی که هر شمع چهار وات مصرف می‌کند و هزار ساعت دوام دارد، برای هر ساعت روشنایی هزینه‌ای حدود ۰٫۴۴ تا ۰٫۵۷ فرانک طلب می‌کند؛
- یک لامپ پیشرفته‌تر، تنها سه وات برای هر شمع مصرف می‌کند و هفتصد ساعت دوام دارد، برای هر ساعت روشنایی هزینه‌ای حدود ۰٫۴۲ تا ۰٫۵۳ فرانک طلب می‌کند؛
- بهای هکتووات ـ ساعت، حدود ۰٫۱۱ تا ۰٫۱۴ فرانک است؛
- یک شیپورهٔ آوئر، که ۱۰ شمع نور دارد، هزینهٔ هر ساعت کار آن ۰٫۱۵ فرانک است؛ (اگر بهای هر متر مکعب گاز ۰٫۳۰ فرانک باشد)؛
- اما یک مشعل شعله پهن، که قویتر است، در هر ساعت ۰٫۴۲ فرانک هزینه برمی‌دارد که برابر لامپ برقی است.

با این‌همه، برق از همان سالهای نخست کاربردش، حتی در دوران لامپهای قوسی، بی‌درنگ به ارزش والایی دست یافت. زمانی‌که فروش صنعتی آن آغاز شد، مالکان آن همواره مشتری داشته‌اند. در برههٔ سالهای ۱۸۱۵ ـ ۱۸۳۰، که شرکتهای تولیدکنندهٔ گاز روشنایی غالباً ورشکست می‌شدند، چنین حوادثی با شرکتهای تولید برق در سالهای ۱۸۸۰ ـ ۱۸۹۰ کاری نداشت. وانگهی خریدهای متعدد و ادغام شرکتها،مشخصهٔ این دوره را تشکیل می‌دهند. برق صنعتی حتی پیش از آنکه کارایی اقتصادی خود را ثابت کرده باشد گویا در جهانی گام نهاد که آن را نوعی کالای مصرفی، نه همیشه ضرور، ولی به‌طور روزافزونی مورد نیاز تلقی می‌کردند. کثرت کارگاهها و سیستمها تا سالهای ۱۹۲۰ مؤید این ادعاست.

افزایش بخشها: آقای ژ.ـ ا. مونپلیه[1] مهندس فرانسوی، بررسی کاملی از وضع فرانسه در سال ۱۹۰۸ تهیه کرده است؛ این وضع تا شروع جنگ جهانی اول دستخوش هیچ تغییری نشد.

تعداد ۱۴۱۳ کارخانهٔ تولید برق برای توزیع با استفاده از خطوط عمومی در آن زمان فعالیت داشتند؛ نیروگاههای اختصاصی بعضی صنایع در این رقم، ملحوظ نشده‌اند. این کارخانه‌ها ۲۹۱۲ محل را تغذیه می‌کردند. در این زمان برق از گاز پیشی گرفته بود که ۸۲۴ کارخانه در تولید آن فعال بودند و تنها به ۱۲۰۹ محل گاز می‌رسانیدند. این ارقام آشکار می‌سازد که شمار زیادی از محله‌های شهر، در نواحی تولید هیدروالکتریک قرار داشتند و در چنین حالتی توزیع برق بسیار آسانتر از توزیع گاز است.

تجهیزات ناقص آبشارها، بیشتر بدین علت بود که بیشتر نیروگاهها، (۸۳۱ نیروگاه) هیدرولیکی

1. J.-A. Montpellier

بودند. در مورد توزیع برق باید گفت که ده سیستم مختلف فعال بودند، علاوه‌بر آنها، تفاوتهای بی‌اهمیتی، مثلاً در مورد تعداد کابلهای توزیع، بسامد جریانهای متناوب و غیره به گوناگونی سیستمها اضافی می‌شد.

جریان مستقیم هنوز و پس از این‌هم، بیشتر به‌کارگرفته می‌شد (۹۴۲ بخش)، و جریان متناوب، به سه شکل خود ـ تک‌فاز (۱۵۷ بخش)، دوفاز (۲۰ بخش) و سه‌فاز (۲۵۶ بخش) ـ رفته‌رفته مهم می‌شد. برخی از بخشها با توزیع مختلط، مستقیم و متناوب؛ تکفاز، دوفاز (یک بخش) و سه‌فاز تأمین می‌شدند.

برق ایالت ایزر که از نظر آبشار غنی است با ۱۶۶ محلهٔ خود بخوبی تأمین شده بود. این ایالت، برق را از ۵۶ کارخانهٔ تولید آن دریافت می‌داشت. در منطقهٔ پاریس که شمار شرکتهای دارندهٔ امتیاز روزافزون بود تا به حومه برق برسانند، کار مهم همانا توزیع برق سه‌فاز بود.

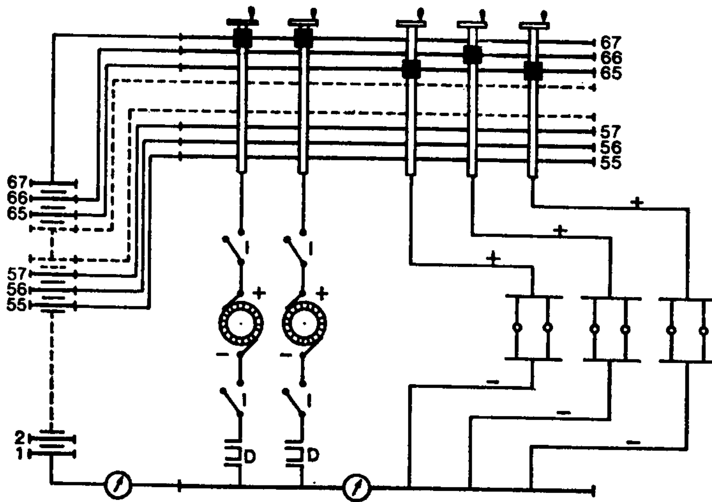
برای اینکه بتوانیم نوع مشکلات موجود را بدانیم خوب است به مبحث تکامل تکنیکهای نخستین توزیع بازگردیم. به‌دنبال تکامل توزیع، انتقال و کاربرد برق، همیشه با مجموعهٔ دشواریهای تازه‌ای روبه‌رو بوده‌ایم که حل آنها ضامن عبور از یک مرحله به مرحلهٔ بعدی است.

تنظیم با آکومولاتور: تنظیم ولتاژ یکی از دشواریهای عمده‌ای بود که می‌بایست از همان آغاز توزیع برق از کارخانه به خانه‌ها، به‌شکل کم‌وبیش رضایتبخشی عملی می‌شد. این دشواری، ویژهٔ توزیع جریان مستقیم نبود اما می‌بایست نخست برای این نوع جریان حل می‌شد، زیرا نخست از این جریان استفاده به‌عمل می‌آمد.

نخستین رگولاتورها که یا با جابه‌جا کردن جاروبکهای دینامها یا با عمل کردن روی دینام راه‌انداز کار می‌کردند آن‌قدر سریع و دقیق نبودند تا در شرایط کاری مولدهای متعددی که با میله‌های آغاز خطوط اتصال موازی دارند، بتوانند با تغییرات ناگهانی با بار برقی مقابله کنند.

همچنین در مورد نیروگاههای پاریس دیدیم که برای اجرای این وظیفه از آکومولاتور به فراوانی استفاده می‌شد (شکل ۷۴). در انگلستان روش بسیار اساسیتری را روی شبکه‌ای که بوسیله ادموندز طرح شده بود پیاده کردند. باتریهای آکومولاتوری را به مشتری واگذار می‌کردند. آنها به دو بخش تقسیم شده بودند که هنگامی‌که یکی روشنایی را تأمین می‌کرد دیگری شارژ می‌شد. جابه‌جاگر (کموتاتور) ها اتصالها را متناوباً معکوس می‌کردند. این سیستم مقتضی نگاهداری پیچیده و گرانی بود و پیشرفت چندانی نیافت. با این‌همه، ۲۵ سال بعد باز در پاریس یک سرویس «روشن‌سازی متناوب آپارتمانها» دیده شد که آکومولاتور نوع تودور[1] آن را تغذیه می‌کرد. هر ماه یک باتری کوچک

1. Tudor



شکل ۷۴.ترسیمهٔ توزیع برق در یک کارخانه پاریس با تنظیم بوسیلهٔ آکومولاتور.
در وسط دو مولد نموده‌شده‌اند. در سمت راست، سه فیدر توزیع که به تأسیسات روشن‌سازی وصل می‌شوند رسم شده‌اند. برگشت جریان بوسیلهٔ مفتولهای مشترک در پایین تصویر انجام می‌گیرد. تنظیم جریان بوسیلهٔ مفتولهای شمارهٔ ۵۵ و ۶۷ تأمین می‌شود که یا از طریق مولدها، یا با باتریهای آکومولاتورها که در سمت چپ تصویر با همان شماره‌ها نموده شده‌اند، عملی می‌شود. این شبکه به مقتضای احتیاج می‌تواند یا با آکومولاتورها تغذیه شود (در حالتی که در شکل آمده است بوسیلهٔ باتریهای ۶۵ و ۶۶)، یا با مولدها. چنانچه کموتاتورها را به‌طور عمودی جابه‌جا کنیم، باز می‌توانیم آکومولاتورها را، چه هنگامی‌که مولدها بیش از مصرف فیدر، برق تهیه می‌کنند، چه درصورتی‌که مولدها به شبکه اتصال ندارند، از نو شارژ کنیم.

شش ولتی به‌جای آن می‌گذاشتند تا سه لامپ را روشن نگاه‌دارد.

آکومولاتور پلانته در اندک مدتی تبدیل بوسیله‌ای شد که در هر اندازه‌ای کاربرد زیاد داشت. در این دوره جهت تنظیم برق، عمدتاً از آکومولاتور استفاده می‌شد. همان سال ۱۸۸۵ باتریهای مهم ۱۱۰ یا ۱۲۰ ولتی می‌توانستند همه توان یک شبکه را در آغاز خطوط تأمین کنند. کیفیت آکومولاتورها و تکنیک کاربرد آنها در حدی بود که در سال ۱۸۸۷ تردیدی به خود راه ندادند که برای پاریس طرح کاملی از روشن‌سازی با کمک آکومولاتورها پیشنهاد کنند که در آن استفاده از ۶۲۰۰ آکومولاتور پیش‌بینی شده بود. سطح مفید هر آکومولاتور شش مترمربع بود. بودجهٔ کل این طرح به ۱۱۰۰۰۰۰ فرانک بالغ می‌شد. برای شارژکردن این آکومولاتورها ۱۰ دینام لازم بود که با

اتصال موازی راه‌اندازی می‌شدند و نیرویی با فشار ۴۵۰ ولت و ۱۵۰۰ آمپر، با ۲۰۰ دور در دقیقه ایجاد می‌کردند و هر دینام را یک موتور بخار ۳۰۰ اسبی می‌گردانید. قدرت مفید آنها ۲۴۰۰ اسب بود و تهیه‌کنندگان این طرحها اطمینان می‌دادند که می‌توان ۵۶۰۰۰ لامپ ۱۰۰ ولتی و ۰/۳ آمپر را با نصب ۵۰ کیلومتر خطوط اصلی با مقطع ۲۵۴ میلیمترمربع و ۵۰۰ آمپر، روشن کرد.

شبکه‌های دو کابلی: در واقع این توزیع برق بوسیلهٔ آکومولاتور، برای مصارف کم و مسافتهای کمتر از یک کیلومتر مناسب بود. این روش تا سال ۱۹۱۴ با مولدهای ۲۰۰ کیلوواتی ادامه یافت. این خطوط را یا دینام، یا باتریها یا در صورت نیاز، هر دو وسیله تغذیه می‌کردند. تجهیزات آنها شامل یک کلید (کموتاتور) باتری بود که وارد مدار کردن بخشی از باتریها در حالت شارژ یا تخلیه را ممکن می‌ساخت و نیز یک گروه ترانسفورماتورهای بالا و پایین‌برندهٔ ولتاژ.

ضخامت این کابلها ثابت و چنان حساب شده بود تا افت ولتاژ برای دورترین گیرنده‌ها از ۵٪ بیشتر نباشد. هر واحد تولید برق، طبق روش بسیار رایج، از دو سیم تشکیل می‌شد.

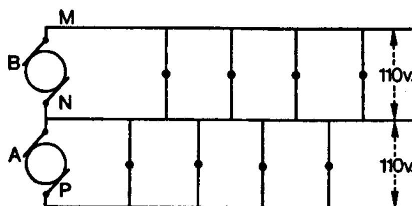
پس از یک دورهٔ کوتاه توزیع با ۶۰ ولت، فشار بسرعت به ۱۱۰ ولت بالا برده شد. در آن زمان در نظر داشتند برای خطوطی که از کیلومتر طولانیتر هستند از ۲۲۰ ولت استفاده شود؛ اما آزمایش این کار به علل گوناگونی، نتیجه‌ای بسیار تردیدآمیز داشت. لامپهای ۲۲۰ ولتی بازدهی کمتر از لامپهای ۱۱۰ ولتی داشتند. موتورهای کوچکی، نظیر چرخهای خیاطی، که در آن زمان تنها ماشینهای خانگی بودند عایق‌سازی بسیار مشکلی داشتند و خطر برق‌گرفتکی زیاد.

شبکه‌های سه و پنج کابلی: در مراکز بزرگ، بسرعت از سیستمهای تکامل یافته‌تری برای مولدهایی که قدرت آنها در سال ۱۹۰۰ به ۱۰۰۰ اسب می‌رسید استفاده شد.

دیده شد که از میان شرکتهای پاریسی، بعضیها، از جمله کنتینانتال ادیسن، به سیستم توزیع سه کابلی و عده‌ای نیز به پنج کابلی روی آوردند.

سیستم سه کابلی را آقای جان هاپکینسون بررسی و توصیه کرده بود. این سیستم کاربرد دو دینام ۱۱۰ ولتی دارای یک نقطهٔ مشترک را که با اتصال زنجیری کار می‌کردند متضمن بود. کابل مرکزی به نقطهٔ مشترک وصل می‌شد و دو کابل دیگر به دو نقطهٔ انتهایی دو دینام (شکل ۷۵). بدین‌ترتیب، بین هر کابل خارجی و کابل مشترک، ولتاژ ۱۱۰ بود و بین دو کابل بیرونی ۲۲۰ ولت. یک گروه مولدهای کمکی می‌توانست به‌طور تکمیلی روی پلی بسیار باردار سوار شود.

آقای ایلایهو تامسن، سیستم سه کابلی پیچیده‌تری را پیشنهاد کرد. یک دینام ۲۲۰ ولتی به کابلهای بیرونی وصل می‌شد. یک گروه کمکی، شامل دو ماشین ۱۱۰ ولتی که بر روی یک مجور



شکل ۷۵.توزیع سه سیمی با دو دینام. سیم نول، N، هیچ جریانی ندارد.

نصب شده بودند و القاگیرهای آنها با اتصال زنجیری به یکدیگر مرتبط می‌شدند، با مدار ۲۲۰ ولتی اتصال می‌یافت. کابل سوم به نقطهٔ مشترک دو ماشین گروه کمکی وصل می‌شد. چنانچه یکی از پلهای ۱۱۰ ولتی بیش از دیگری بار می‌شد، فشار آن به پایین‌تر از ۱۱۰ افت می‌کرد و دینامی که بدان اتصال داشت به‌عنوان ژنراتور فعال می‌شد و دینام دیگر همچون موتور دینامی کار می‌کرد. این گروه ماشینها بدین‌ترتیب انتقال انرژی را از یک پل به دیگری تأمین می‌کرد. این سیستم، برگشت‌پذیر بود.

ترکیبهایی از همین نوع، برای پاسخ به نیازهای بسیار اساسی، پس از اندک مدتی، ساخت سیستم پنج کابلی را با یک گروه کمکی دارای چهار القاگیر ممکن ساختند (شکلهای ۷۶، ۷۷، ۷۸).

شبکهٔ توزیع میدان کلیشی[1] واقع در پاریس، این‌گونه تغذیه می‌شد.

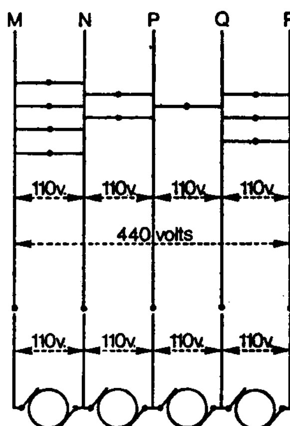
تنظیم شبکه: برای پیشگیری از قطع کلی جریان در یک شبکه در صورت بروز یک حادثهٔ محلی، سیستم حلقه‌ای کردن خطوط را بسرعت تعمیم دادند. مثلاً یک شبکهٔ سه کابلی با گروه ماشینهای کمکی شامل دو فیدر بود که مولدها را به دو سر خط وصل می‌کردند. با این ترتیب امکان تغذیهٔ یک خانه، از طریق این یا آن سر خط، تأمین می‌شد.

این سیستم در شهرهای بزرگ رفته‌رفته پیچیده شد تا آن حد که شبکه‌هایی توری ـ شکل ساخته شد که بعضی از گره‌ها از طریق فیدرها به نیروگاه اتصال داشتند.

طی حدود پانزده سال، سیستم یک مولد از طریق فیدر، جای خود را به «شین اصلی»[2] واگذاشت که همهٔ دینامها به‌طور موازی بدان متصل، و همه فیدرهای توزیع از آنجا شروع می‌شدند. تعداد دینامها متناسب با مقدار انرژی مورد تقاضا از شبکه تغییر می‌کرد. در ممالک متحدهٔامریکا،

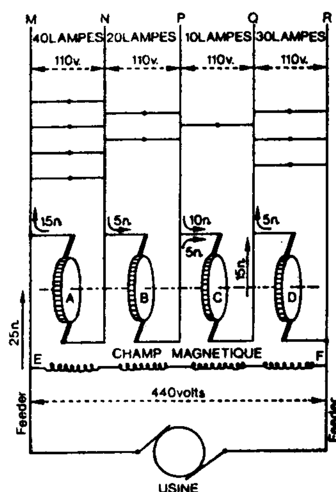
1. Clichy

۲. omnibus bar یا bus bar مفتول یا تسمه مسی ضخیمی که در تابلو برق، حامل یکی از جریانهای اصلی است. ـ م

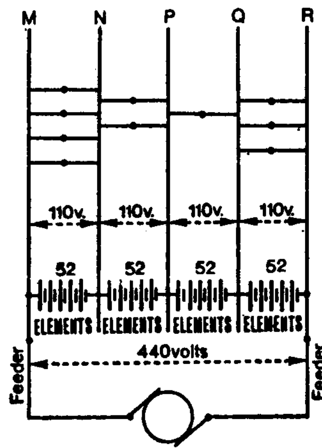


شکل ۷۶.توزیع پنج سیمی با چهار دینام.

این سیستم به‌علت هزینهٔ بالای اجرای کار، با سیستمهای که در شکلهای ۷۷ و ۷۸ نموده شده‌اند تعویض شده است.



شکل ۷۷.توزیع پنج سیمی با یک دینام ۴۴۰ ولتی و چهار دینام تنظیم‌کنندهٔ ۱۱۰ ولتی که روی یک محور نصب شده‌اند و می‌توانند برحسب نیاز بخش، در نقش گیرنده یا مولد عمل کنند.



شکل ۷۸.توزیع پنج سیمی با یک دینام ۴۴۰ ولتی و چهار باتری آکومولاتور، که برحسب نیاز بخش می‌تواند برق بدهند یا شارژ شوند.

که از همان ابتدای کار، آن را که با دینام ۱۲۵ اسبی ادیسن مجهز بود، بزرگ یافتند بهتر دیدند که زمانی‌که قدرت مورد نیاز رو به افزایش دارد شمار مولدها را از ۲۵۰ اسب مثلاً به ۵۰۰ اسب برسانند تا اینکه واحدهای بزرگ را به‌کار گیرند.

شبکه‌های شهری از همان آغاز تشکیل، دارای ایستگاههای فرعی بودند که در مرکز تراکم محلات تحت پوشش ساخته می‌شدند. این ایستگاهها، برق را توسط یک فیدر اصلی از نیروگاه دریافت می‌کردند، ولتاژ آن را، در صورت نیاز بوسیله یک تبدیلگر (کموتاتور) کاهش می‌دادند و هرکدام مثلاً یک شبکهٔ سه کابلی را تغذیه می‌کردند. باتریهای آکومولاتورها را در آن زمان در همین ایستگاههای فرعی در اتصال موازی با گروه ماشینهای کمکی قرار می‌دادند و نقش فرستندهٔ انرژی به آنها می‌دادند.

توزیع جریان متناوب: توزیع جریان متناوب، با وجود تفوق جریان مستقیم که تا اواخر سالهای ۲۰ این سده ادامه داشت، از همان سالهای نخستین عمل می‌شد. نخست از جریان متناوب تک‌فاز، سپس از سال ۱۸۹۱ از جریان دو یا سه فاز استفاده می‌شد. همان اصول کلی حاکم بر جریان مستقیم در این زمینه نیز وجود دارند: سیستم حلقه‌ای، فیدرها، نیروگاههای فرعی.

برتری جریان متناوب بیدرنگ آشکار شد. انتقال این جریان بافشار قوی ـ برای پرهیز از اتلاف

در خط ـ آسانتر انجام می‌گرفت. ولتاژهای انتقال در آغاز ۳۰۰۰، بعد ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ بود و در سال ۱۹۱۰ به ۱۵۰۰۰ ولت رسید.

ترانسفورماتورهای ثابت که در محل نیروگاه و در مرکز پیش از انشعاب برق به مشتری کار گذاشته می‌شد هیچ‌گونه مراقبت دائمی نیاز نداشت. این امر سبب شد که بی‌درنگ، در پیاده‌روها یا در زیرزمین خانه‌ها، پستهای فرعی کوچکی با تنها یک ترانسفورماتور خانگی کار بگذارند. اتصال زنجیری ورودیها ترانسفورماتورها شروع شد. سپس ترتیب درست‌تری از اتصال موازی ورودیها پذیرفته شد و در شهرها دو نوع شبکه دیده می‌شد: فشار قوی و فشار ضعیف، روبه‌روی یکدیگر.

شبکه‌های مختلط، متناوب و مستقیم را هم می‌شد برقرار کرد که دیگر از دینام و آلترناتور تغذیه نمی‌کردند، کاری که مثلاً ادیسن در پاریس کرد؛ بلکه در آغاز توزیع، صرفاً از آلترناتور با ترانسفورماتورهای بالابرندهٔ ولتاژ تغذیه می‌کنند، و در پستهای فرعی، از ترانسفورماتورهای پایین‌آورندهٔ ولتاژ و کوموتاتورهایی که جریان مستقیم با فشار ضعیف به شبکه می‌دهند.

بسامدهای جریان متناوب، برپایهٔ معیارهای تغییرپذیری بوسیلهٔ شرکتها انتخاب می‌شدند. در شبکه‌های اروپایی، بسامد رایج، بیشتر ۲۵، ۴۰ یا ۵۰ دور بود و بیشتر بسامدها را می‌شد در شهرهای بزرگ منطبق کرد. در امریکا از سیستمی برپایهٔ ۱۲، بسامد ۶۰ دور استفاده می‌شد.

درکشوری مانند فرانسه، تنوع بسامدها برای سازندگان وسایل برقی، دردسر بود ـ دردسری که تا شروع نیمهٔ دوم این سده ادامه داشت. بخشی بزرگی از مناطق کنار دریای مدیترانه با ۲۵ دور در ثانیه کار می‌کردند، درحالی‌که مناطق دیگر رفته‌رفته بسامد ۵۰ دور را پذیرفتند. یکی شدن بسامد روی ۵۰ دور، که در سال ۱۹۴۹ پذیرفته شد تا سال ۱۹۵۵ به پایان نرسید.

مشکل دیگری از یکنواخت شدن، در آغاز نیمهٔ دوم همین سده، ولتاژ برق توزیعی به مصرف‌کنندگان جریان متناوب بود. صنایعی که مصرف برق در آنها همچون مادهٔ خام به‌شمار می‌آمد، مانند: صنایع شیمیایی، صنایع سیدرورژی (آهنکاری)، همیشه برق فشارقوی را، حتی در زمانی‌که این ولتاژ به چند هزار می‌رسید، به‌کار می‌گرفتند. این صنایع، که برق نیروی محرکهٔ آنها بود، اینک آن را در فشار متوسط ۱۵ تا ۲۰ هزار ولت دریافت می‌داشتند، و همان‌طورکه گفته‌ایم، این کاربرد برق، تنها با آغاز دوره‌ای که فاصلهٔ بین دو جنگ جهانی را می‌پوشاند توسعه یافت. علت این امر عمومیت یافتن شبکه‌های انتقال و توزیع برق در همهٔ کشورهای صنعتی بود. این فرایند تکنیکی طبعاً با پیشرفت باز هم سریع ساخت وسایل الکترومکانیکی دنبال شد. موتور برقی، گیرنده بسیار شناخته شدهٔ انرژی برق است. این موتور عملاً برای همه کاربردهای احتمالی درکارگاههای متعدد تولید جدید انطباق یافته است. ساخت این وسیله در مدت اندکی به مقیاس زیاد بوسیلهٔ

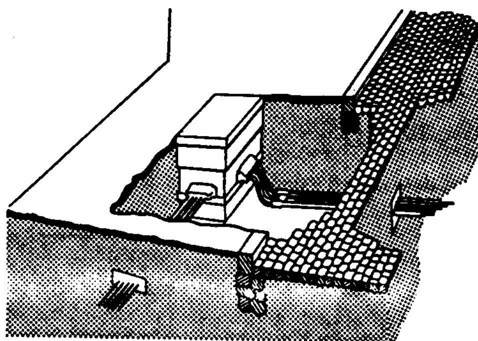
کارخانه‌هایی که بازارهای جهانی را تسخیر کرده‌اند تأمین شد. هم‌چنین، پس از جنگ جهانی دوم، از زمانی‌که برق عملاً جانشین همهٔ اشکال دیگر انتقال انرژی در صنعت شده است، اتحادیه‌های بین‌المللی در بخش توزیع، مسؤول یکنواخت کردن مشخصات وسایل برقی شده‌اند.

همین عوامل برای یکنواخت شدن توزیع برق فشار ضعیف جهت کارهای خانگی فشار می‌آورند. از زمان جنگ جهانی دوم، بر حجم و گوناگونی وسایل برقی خانگی افزوده شده است. تولید این وسایل که در پایان سالهای ۳۰، کمی صنعتی شده بود، با آغاز سالهای ۵۰ به صنعتی بار شد سریع تبدیل شد. این هجوم وسایل جدید خانگی با پیشرفت مواد سنتزی ساخت صنایع شیمیایی بستگی داشت. اتحادیه‌های جهانی صنایع به بالا بردن ولتاژ فشارهای ضعیف، که از فشارهای قدیم ۱۱۰ به ۲۲۰ بین فاز و نول و ۳۸۰ بین دو فاز رسیده بود رهنمون شدند. این یکنواختی که در سال ۱۹۶۰ در فرانسه پذیرفته شد با آهستگی ادامه یافت.

لوازم انشعاب: شبکهٔ توزیع معمولاً در محل مشتری با انشعاب از خطوط بخش پایان می‌گیرد. همهٔ شرکتهای دارندهٔ امتیاز ناگزیر به ساخت لوازم ویژه‌ای برای اجرای این مراحل نهائی توزیع بودند. دیدیم که آقای ادیسن، پایهٔ لوازم کار خود را بر بهتر کردن وسایل اولیه قرار داد. گرچه همراه با زیاد شدن شرکتها، از همان سالهای نخست، تنوع اجسام ساخته شدهٔ ویژهٔ این کار بسرعت فزونی گرفت، جالب است بدانیم که اصول اولیه عملاً دستخوش تغییری نشد: جعبه‌های چدنی انشعاب، در محل که درب آنها آسان باز می‌شد و اتصالهای کابلهای اصلی با کابلهای انشعاب که با انبرکهای مسی یا با پیچ یا با وسیلهٔ فشاری دیگری انجام می‌گرفت. مقطع یا انتهای کابلها عریان بودند. جعبهٔ انشعاب خانه‌ها را بی‌درنگ با فیوز حفاظتی مجهز می‌کردند (شکلهای ۷۹ و ۸۰).

در همین دوره بود که عَلَم (رایزر)های خانه‌ها، که در آن زمان از افزارهای چوبی شیارداری تشکیل می‌شد که کابلهای عایق شده با پارچه‌های پنبه‌ای پارافین خورده یا کائوچوی وولکانش شده در آن گذاشته می‌شد، و نیز جعبه‌های انشعاب برای هر مشترک که آنها نیز دارای فیوزهای حفاظتی برای هر تأسیستات خصوصی بودند، رواج یافتند. همه جعبه‌های چدنی، با اتصال به زمین مجهز بودند.

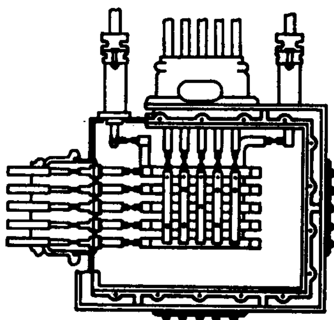
گوناگونی لوازم انشعاب، از یکسوی نتیجهٔ شکل جریان و روش توزیع بود: برای جریان مستقیم، توزیع دو، سه یا پنج کابلی انجام می‌شد و برای جریان متناوب، کاربرد یک ترانسفورماتور در خانهٔ مشترک الزامی بود. مقرراتی در اوایل کار، گذاردن ترانسفورماتور در کانالهای زیر پیاده‌روها را منع می‌کرد. استانده کردن کارها با کندی زیاد و بتدریج که تعداد شرکتهای توزیع کاهش می‌یافت انجام می‌گرفت. برای مجتمعی نظیر پاریس و حومهٔ آن تنها یک شرکت در سال ۱۹۲۰ به‌نام شرکت توزیع



شکل ۷۹.کانال زیرزمینی با جعبهٔ انشعاب، در پاریس.

برق در پاریس، برای خود شهر و چهار شرکت دیگر وابسته به آن، برای حومه خدمت می‌کردند. یک‌نواختی کلی، تنها پس از جنگ جهانی دوم آغاز شد، زمانی‌که انحصار تولید، انتقال و توزیع برق به یک شرکت ملی شده به‌نام: برق فرانسه، که کمی بعد به: برق و گاز فرانسه تغییر نام یافت واگذار شد. مدیریت فنی و اقتصادی همهٔ این تأسیسات، از این پس مستلزم یک همکاری در مقیاس وسیع بود که، همچنانکه بعدها خواهیم دید، از محدوده مرزهای سیاسی می‌گذشت.

محاسبهٔ مصرف: دراین‌باره می‌توان گفت که در یک مدت کوتاه، وسایل متعدد دیگری، نه‌تنها طراحی، که در مقیاس صنعتی ساخته شدند. از آن جمله وسایلی بودند که برای محاسبهٔ مصرف ـ مسأله‌ای که در آن زمان حل آن بسیار دشوار بود ـ به‌کار گرفته شدند.



شکل ۸۰.نمایهٔ یک جعبهٔ انشعاب.

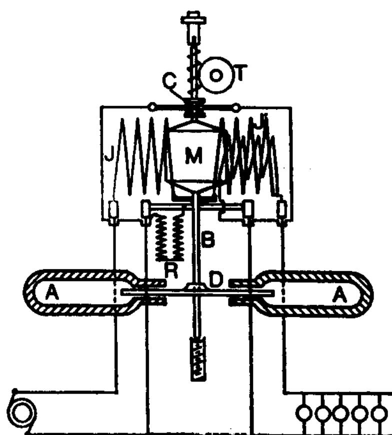
کنتورهای الکترولیزی ادیسن، نوعی راه‌حل شانسی بود که تنها در مدت کوتاه راه افتادن، که تعداد مشتریان نسبتاً کم بود، مفید واقع شد. بعضی از شرکتها، در آغاز از اصل مقاطعه استفاده کردند و وجه دریافتی بستگی به تعداد لامپها یا موتورهای کوچک (هنوز بسیار نادر) هر مؤسسه شخصی و نیز مدت تخمینی کار روزانه آن داشت. برای جلوگیری از تقلب، گاهی از محدودکننده‌های شدت استفاده می‌شد که جریان برق را در صورت تجاوز از حد، به‌طور خودکار قطع می‌کرد. برای این کار ابزارهای گوناگونی پیشنهاد شدند.

راه‌حل دیگری برای شانه خالی کردن از شمارش، این بود که طی روز تنها چند ساعت برق داده شود و این محدودیت به کمک وسایلی از قبیل آنچه که «سازره»[1] نام داشت انجام می‌گرفت. وسیله‌ای که تغذیه و قطع را با بسامد بالا تأمین می‌کرد و از نیروگاه به آن فرمان داده می‌شد. سرانجام، راه‌حل بسیار سادهٔ توزیع جریان برای روشن‌سازی به‌شکل مقاطعه، بدون محدودیت در نواحی کوهستانی دارای مراکز هیدروالکتریک معمول شد. در این نواحی، مصرف شخصی در برابر مقدار مصارف صنعتی قابل اعتنا نیست. این روش در بعضی از دره‌های آلپ، در اوایل سالهای ۲۰ هنوز هم اجرا می‌شد.

بااین‌حال، همهٔ این سازشهای می‌بایست جای خود را بروشهای کارآمدتر محاسبه واگذارند، کاری که در بیشتر جاها پیش از پایان سدهٔ نوزدهم انجام گرفت. در همین زمان است که نخستین کنتور جریان مستقیم که مصرف را برحسب وات مستقیماً روی صفحهٔ خود نشان می‌داد طرحریزی شد. این وسایل که مصرف‌کننده‌های واقعی بودند و قطعه‌ای در آنها، با مصرف برق می‌گردید، خودشان تنها مقدار ناچیزی از انرژی را مصرف می‌کردند، اما نظم کاری آنها به مشتری اعتماد کامل القا می‌کرد.

تا پیش از سال ۱۸۹۰ ترتیبات گوناگونی به‌کارگرفته شدند. در فرانسه کنتور آرون[2] دارای دو آونگ هم مدت (isochrone) بود که یکی قرقره‌ای از سیمهای ظریف داشت که قرقرهٔ دیگری از سیمهای ضخیم آن را دفع می‌کرد و در نتیجه؛ حرکت آن سرعت می‌گرفت. آونگها هریک در جهت مقابل یکدیگر، نوعی حرکت ساعتی را تحریک می‌کردند که متناسب با حاصل‌ضرب EI (فشار × شدت) به پیش می‌رفت. این مکانیسم و مونتاژهای برقی آن بسیار پیچیده بودند اما آقای آرون توانست نمونه‌های محکم و دقیقی از آن را بسازد. از سوی دیگر، وی بدون اینکه اصل کلی را زیر پا بگذارد انواعی از آن را ساخت که با همهٔ سیستمهای توزیع، و بعدها با تمام اشکال جریان برق جور می‌شدند.

1. Sageret 2. Aron



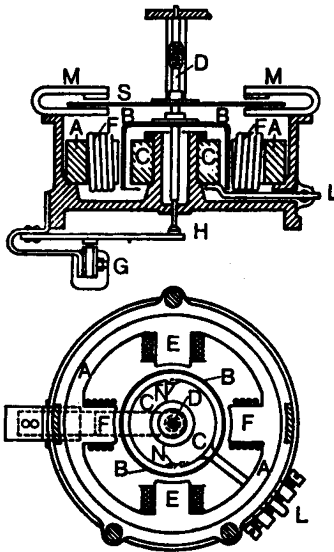
شکل ۸۱.کنتور- موتور ساخت تامسن.
از یک موتور کوچک تشکیل شده است که M القاگیر و J القاگر آن جریان مورد نظر را از خود می‌گذرانند. این جریان بوسیلهٔ میلهٔ B، دیسک آلومینیمی D را بین قطبهای A دو آهنربای دائم می‌چرخانند. این دو آهنربا اثر ضد نوسان فازها را دارند. قطعه T که در بالای شکل دیده می‌شود، دور شمار است.

آقای بریلیه کنتوری طرح کرد که مقدار وات در ساعت را می‌سنجید. جریان متناوبی که شدت آن متناسب با شدت جریان توزیع شده بود از قرقره‌های متحرک آن می‌گذشت و برای قرقرهٔ متحرک، با ولتاژ آن تناسب داشت. محور قرقرهٔ اخیر حامل یک دیسک مسی بود که تحت تأثیر دو آهنربای دائم، با سرعت متغیری برحسب موقعیت قرقرهٔ متحرک می‌چرخید. کوپل مقاومت، که نتیجهٔ جریان فوکو بود، رابطهٔ ثابتی با زاویهٔ انحراف این قرقرهٔ داشت.

از میان کنتورهایی که بیش از بقیه رواج داشتند، کنتور آقای تامسن در همان دوران است که دینام کوچکی بود که القاگیر و القاگر آن، هر دو بدون آهن، یکی با اتصال موازی و دیگری با زنجیری با جریان اصلی مربوط می‌شدند.

کوپل آن متناسب با حاصل‌ضرب EI بود. یک دیسک مسی که به القاگیر متصل بود تحت تأثیر آهنرباهای دائم نعل اسبی قرار می‌گرفت و از طریق جریانهای فوکو، کوپل مقاومی متناسب با سرعت تولید می‌کرد (شکل ۸۱).

کنتور آرون و نیز کنتور تامسن می‌توانند هم با جریان مستقیم و هم با جریان متناوب تک‌فاز بخوبی کار کنند. زمانی‌که باید با جریان چند فاز کارکرد کار کمی دشوار می‌شود، اما در آن زمان



شکل ۸۲.کنتور فرّاری.
نمای افقی و عمودی: جریان اصلی از قرقره‌های قطبهای F طوقه A می‌گذرد. بوبینهای دارای سیم ظریف قطبهای E با اتصال موازی تغذیه می‌شوند. طبلک B که آلومینیمی است میان این پلها و استوانهٔ C که از آهن نرم است، می‌چرخد. میل پیچ D یک جمع‌زن را فعال می‌سازد. در اینجا سیستم نوسانگر S و M دیده می‌شود. قطعات H و G وسیله‌ای برای کم کردن اصطکاکهای محور هستند.

وسایل مورد نیاز برای این کار، چنان انعطافپذیر بودند که بسرعت تطبیق داده شدند. استفاده از میدانهای چرخان فرّاری، بویژه کاربرد اصل موتور ناهمزمان (آسنکرون) را در ساخت وسایل محاسبه ممکن ساخت (شکل ۸۲). طی چند سال مدلهای گوناگونی ارائه و به‌کار گرفته شدند. تکامل کنتورهای برق بعدها نیز برای انطباق با همه نوع کاربرد، ادامه یافت.

وسایل گوناگون دیگری برای تجهیز بخشها لازم آمد: وسایل مانور کلیدهایی که با دست یا با فرمان از دور عمل می‌کردند، دیژونکتورها، وسایل کنترل، وسایل تنظیم و غیره که در دوران نوآوری بسرعت ساخته شدند. پیش از سال ۱۹۰۰ همچنین وسایلی برپایهٔ اصول و با اشکالی که تا نیم سده، عملاً تغییری در آنها راه نیافت طرحریزی شدند. تنها در پرتو دسترسی به مواد جدید بود که کاربرد مصالح فلزی کاهش یافت یا وسایل تازه‌ای، که از میانهٔ همین سده تحولات سریعی را سبب

شدند، بی‌درنگ به‌کار گرفته شدند. همچنین اصلاحات زیادی در دیژونکتورها انجام گرفت، مثلاً در پرتو تغییر نوع کنتاکتها و به‌کارگیری روشهای گوناگون: وزش مغناطیسی قوسهای قطع مدار، قطع مدار در روغن، قطع پنوماتیکی مدار و غیره.

تحول روشهای تولید برق

ادواری بودن پیشرفت برق صنعتی: توسعهٔ کشش با برق در زمانهای بعد، و پیشرفت برق صنعتی، مبانی کاربرد برق به‌عنوان نیروی محرکه در کارخانه‌ها و کارگاهها، در جنب کمک به روشن‌سازی، عواملی هستند که افزایش پیوستهٔ نیاز به برق را در کشورهای صنعتی موجب شدند. پس از یک دورهٔ بسیار آرام تحول که دو دههٔ نخستین سدهٔ حاضر را می‌پوشاند، دورهٔ دیگری فرارسید که در طی آن، علاوه‌بر اینکه نخستین گرایشها برای تکمیل وسایل تولید برق بروز کرد، به نقشی که برق قرار است بعدها در همهٔ رشته‌های گروهی و انفرادی داشته باشد نیز آگاهی یافتند. این دوره مقارن دهه‌هایی است که فاصلهٔ دو جنگ جهانی را فرامی‌گیرند.

فرایندی که طبق آن این پدیده ایجاد شد، پیچیدگی بسیار دارد. از لحاظی، هنوز چیز دیگری جز استمرار دورهٔ راه‌اندازی، سالهای ۱۸۸۰ ـ ۱۸۹۰ نیست. اما عواملی با بازتابهای بسیار ژرف آن را تغذیه کرده‌اند. از یکسوی شبهه‌ای نیست که در پایان جنگ جهانی اول، رشتهٔ الکتروتکنیک آزمایشهای خود را پشت‌سر گذارده بود. برای اینکه منزلت آن در متن این عصر معلوم شود، می‌توان گفت که الکتروتکنیک بنوعی رسیدگی دست یافته بود، بشرط اینکه مفهوم سیرشدگی یا بی‌تحرکی از این واژه استنباط نشود.

ساخت و کاربرد مصالح برقی، در همهٔ سطوح آن، در اختیار وسایلی بود هنوز همهٔ آثار خود را نشان نداده بودند، اما آن‌چنان توانا، که تکنسین‌ها و نیز تودهٔ مردم پذیرفتند که این رشته، پایه نیرومندی برای یک مرحلهٔ نوین پیشرفت است. از سوی دیگر، مصرف‌کنندگان آینده و دست در کاران سیاست کلی، رفته‌رفته گوش شنوایی از لحاظ امکانات انجام و عده‌های خود یافتند.

جنگ جهانی اول آهنگ رشد الکتروشیمی و الکترومتالورژی را بشدت شتابان کرد. در رشته‌های دیگر صنعتی، انرژی انتقال یافته بوسیلهٔ الکتریسیته، به‌عنوان نیروی محرکه، دارای کاربرد بسیار پرانعطاف و متنوعی شناخته شد که الزامات جغرافیایی یا اقتصادی، که از یک سدهٔ پیش، پیروی از بعضی صنایع بومی را تحمیل کرده بودند با قدرت از بین برد. اما همچنین، آیا نمی‌بایست این انرژی در همه‌جا در دسترس باشد. بنابراین، به‌سوی تولید زیاد الکتریسیتهٔ روی آوردند و برای

رسیدن به این منظور آن عده از مناطقی را که از نظر هیدروالکتریسیته مناسب می‌نمودند شروع به تجهیز کردند و با تکثیر نیروگاههای حرارتی در مناطق صنعتی دور از دسترس مراکز هیدرولیکی، محدودیت انتقال برق به جاهای دور را کاهش دادند.

مقدار مصرف برق در شهرها، برای ادارات، نیازهای خانگی و تفریح، چنان افزایش یافت که توزیع بسیار متراکم شد و بهای تأسیسات و وسایل مصرفی و نیز بهای خود مصرف رو به کاهش گذاشت. روشن‌سازی با برق، دیگر امتیاز محله‌های اعیان‌نشین نبود، برقی کردن وسایل اداری تا اندازه‌ای، و نیز برقی کردن تجهیزات مجتمعهای مسکونی، اعم از خدماتی و تفریحی، آسانسورها، تهویه، نورافکنهای سینماها، تا حدودی انجام گرفته بود. وسایل ارتباطی، تلگراف، تلفن و ایستگاههایی فرستندهٔ رادیویی که در فشرده‌تر ساختن مردم کشورهای صنعتی در چارچوب نوعی زندگی بر پایهٔ الگوی مصرف برق مؤثر بودند نیز در همین راستا به پیش رفته بودند.

بالاخره در کشورهای اروپای غربی و امریکای شمالی، دلمشغولی تازه‌ای پدید آمده بود و آن جلوگیری از مهاجرت روستاها به شهرها بود. شرکتهای صنعتی از این بیم داشتند که شاهد خشک شدن منابع غذایی باشند، هرچند که حدود صدوپنجاه سال بود که سایهٔ قحطی از سرزمین آنها بکلی رخت بربسته بود.

انتقال برق به روستا به هدف اصلی جلوگیری از مهاجرت روستاییان با ایجاد راحتی بیشتر برای آنان بود که علاوه‌بر روشنایی با برق، سبک کردن کار کشاورزی، گرچه مقدار کم هم، مورد نظر بود. نتیجهٔ برق رسانیدن به روستا استقرار شبکه‌های انتقال و توزیع برق در سراسر سرزمین بعضی کشورها بود.

باز در همین برههٔ فاصلهٔ دو جنگ، نوعی تعادل بین جاذبه‌های یک تکنیک جدید که لزوماً تحول ویژهٔ خود را داشت و نیازهای تازه‌ای که ایجاد می‌کرد ـ بدون برق صنعتی سینما و تلفن بی‌سیم به‌وجود نمی‌آمد ـ و دغدغه‌های نیازمندیها و دورنمای سودهایی که برای گسترش الکتروتکنیک متصور بود، چارچوب اقتصادی خوبی فراهم می‌کرد.

پس از جنگ جهانی دوم، مرحلهٔ سومی آغاز شد که روابط عوامل تکامل‌دهندهٔ برق صنعتی طی آن عمیقاً تغییر یافت. برقی کردن، شرط بنیادین صنعتی شدن و رشد اقتصادی شد. در واقع در این دوره کشف خاصی نشد. این مفهوم رفته‌رفته در گذر دوران پیش زاییده شده بود. در اتحاد شوروی (سابق)، مثلاً همین‌که خطرهای بزرگ سالهای پس از اکتبر ۱۹۱۷ برطرف شدند، برقی کردن به یک دگم سیاسی تبدیل شد، و بدین دلیل تولید این کشور که در سال ۱۹۱۳ بیش از

دو میلیارد کیلووات در ساعت نبود در ۱۹۳۰ از هشت میلیارد و در ۱۹۳۸ از ۴۰ میلیارد هم گذشت. در کشورهای صنعتی دیگر، این طرز فکر جدید، با مساعی فراوان خلق تکنیک، که جنگ جهانی دوم انگیزهٔ آن بود تقویت شد. حتی کشوری مانند فرانسه هم، که تحت تأثیر خاص مرحلهٔ اول نبردها قرار گرفته بود؛ در زمان جنگ و در شرایط اشغال دشمن هم کارهای برقی کردن یکی از خطوط اصلی راه‌آهن، خط پاریس به لیون را شروع کرد و با این کار برنامه برقی کردن کلی کشور را که در سالهای ۳۰ آغاز شده بود، پی‌گرفت.

دلواپسی مربوط به افزایش مصرف، در این مرحلهٔ سوم، به عوامل اصلی برای پیشرفتهای فنی در این رشته تبدیل شدند. همین وضع در همهٔ بخشهای کار صنعتی و کشاورزی به چشم می‌خورد، اما گویا در مورد برق خیلی چشمگیر بود، زیرا برق، مانند شیمی، در راه برطرف ساختن نیازهای بسیار گسترده‌ای خدمت می‌کند ـ این رشته بعدها هم به‌علت منطق درونی تحولات خاص خود چنین خواهد بود. وانگهی تکنیکهای صنایع بزرگ دیگر، که برق از همان آغاز، با آنها روابط متقابلی داشته است، نیز دستخوش چنین تحولی بوده‌اند: متالورژی، برای تولید کابلها و ترانسفورماتورها؛ شیمی برای تولید اجسام عایق جدید؛ الکترونیک، برای فرمان از دور و اتوماسیون؛ و غیره.

همهٔ این موقعیتها، ضرباهنگ تندی از تحول را تحمیل کردند که شتاب آن گویا در روزگار ما هم پایان نخواهد یافت: تحول مولدها و در مقابل طبعاً، وسایل برقی که از این پس نمی‌توان آن را، به‌تفصیل در این کتاب دنبال کرد. تحول در کاربرد منابع انرژی و تکنیکهای انتقال جریان، که باید کوشید تا خطوط اصلی آن را، برای فهم سرشت این پدیده ـ به‌دست دهیم.

نیروگاههای جدید حرارتی: برق از همان مرحلهٔ اول، در پایان سدهٔ گذشته، با تغییر شکل انرژی حرارتی یا انرژی هیدرولیک تولید می‌شد.

در رابطهٔ با انرژی حرارتی، برق صنعتی این فرصت را داشته است که از همان آغاز کاربرد خود، دو نوع نخستین توربین بخاری، توربین پارسنز، و توربین لاوال را در اختیار داشته باشد. می‌توان اندیشید که توربین بخاری این شانس را داشته است که زمانی اختراع شد که کاربرد ویژه‌ای برای آن آماده بود.

کاربرد دیگری که موفقیت حتمی داشت هماناً حرکت کشتیها بود، که زیاد هم ناگزیر نبود. گرچه موتور کلاسیک پیستونی، چندین دهه فعال باقی ماند، این توربین تنها وسیلهٔ تکنیکی بود که قدرت تولیدی نیروگاههای حرارتی را بتدریج افزایش می‌داد. تحول این بخش از تکنیک، متضمن تغییر شکل تدریجی روشهای تولید بخار بود که هنوز هم ادامه دارد.

انواع تازهٔ دیگهای بخار که به ساخت دستگاههای چندین صدمگاواتی با جریان بسته آب تبخیری و سراسر خودکار، گوناگونی سوختها، برپایهٔ شرایط اقتصادی تأمین آنها برای هر کشور: گرد زغال، لینییت (زغال سنگ قهوه‌ای)، سوخت یا گاز طبیعی منجر شد. این وضع دستکاری مجدد تجهیزات سوختی را ناگزیر می‌ساخت، تا جایی‌که امکان تعویض یک سوخت با دیگری، طبق شرایط زمان فراهم آمد. مرحلهٔ نهائی تا زمان حاضر، تحول نیروگاههای حرارتی، استفاده از توربین گازی است که از سالهای ۶۰ شروع شده است.

افزایش حجم دستگاههای تولید برق، تعدادی محدودیتها را آشکار ساخت: لزوم تأمین مقادیر بیش از پیش سوخت، تأمین آن اساساً از طریق راه آبی و انبار کردن آن روی سطوح بیش از پیش وسیع، حتی در مورد هیدروکربنها؛ کاربرد مقدار قابل توجهی آب برای خنک کردن، که مستلزم شرایط جغرافیایی معینی است؛ تخلیهٔ گازهای سوختی و خاکسترها، در صورت کاربرد سوخت جامد.

مسألهٔ محدود کردن و در صورت امکان از بین بردن، آلودگیهای زیانبخش که محیط دیگر تاب تحمل آنها را ندارد. همهٔ این مسائل، انگیزهٔ آفرینش پیوستهٔ وسایل فنی تازه‌ای بودند: غبارگیری الکتروستاتیکی، جذب اکسیدهای کربن، برجهای مرتفع برای تخلیهٔ فضولات گازی دیگر، برجهای خنک‌کنندهٔ آب، استفادهٔ مجدد از خاکسترها. همهٔ این تکنیکهای جذب آثار فرعی، ویژهٔ نیروگاههای حرارتی نبودند، اما کاربرد الزامی آنها، همراه با دیگر عوامل ویژه، در تغییر شکل بنیادی طرح این کارخانه‌ها مؤثر بوده است چیزی که سی یا چهل سال پیش نمی‌توانستند آن را پیش‌بینی کنند.

توربینهای هیدرولیک: در مجلد پیش دیدیم که نخستین توربینهای هیدرولیک در چه شرایطی در فرانسه ساخته شدند (مجلد سوم، صفحه ۴۶).

انواع دیگری از توربینها، پس از توربینهای مرکزگریز فورنرون و توربینهای (با جریان) محوری اختراعی ژونوال ـ کوشلن در اندک مدتی ساخته شدند. از توربینهای بسیار رایج می‌توان از توربین ژیرار و نیز توربین اختراعی فونتن ـ بارون نام برد. این توربینها از نظر اصول کار، یا ویژگیهای دریچه‌های آبرو، یا امر توزیع، تفاوت چندانی با انواع پیشین ندارند. توربینهای فرانسوی پیش از سال ۱۸۵۰ تا حدود پایان همان سده، به‌عبارت دیگر در تمام دورانی که انتقال انرژی، تنها با وسایل مکانیکی انجام می‌گرفت، رواج داشتند.

این توربینها پس از مدت کوتاهی، در زمانی‌که نیاز به نیروی محرکه در امریکا رشد سریعی یافت، و تأسیسات هیدرولیک در مناطق شرقی امریکا ـ بویژه در نیوانگلند، که تأسیسات صنعتی

بسیار متعدد و بسیار بزرگ داشت ـ فراوان شده بودند، به آن کشور صادر شدند. در آن زمان توربینهای گوناگونی شناخته می‌شدند که بذر تحولی از توربینهای کلاسیک در خود داشتند. بویژه توربین آقای زیبولون پارکر[1]، در ۱۸۳۰، که نوعی توربین واکنشی یا فشاری غوطه‌ور؛ با دریچه‌های پروانه‌ای بود. این توربین بسیار رواج یافت و بتدریج کاملتر شد و بعدها در ممالک متحدهٔ امریکا آن را چیزی بینابین توربین و چرخاب افقی با جریان مارپیچ (tub-wheel) دانستند.

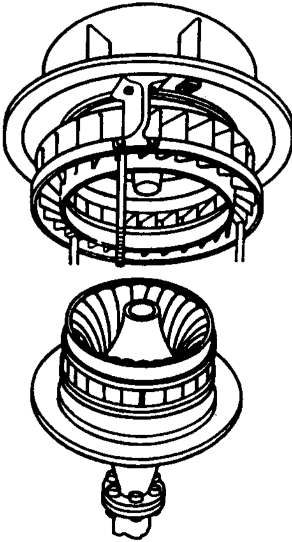
توربین فرانسیس: امریکایی کارورز دیگری با نام سمیوئل ب. هاود در ۱۸۳۸ امتیازی برای یک توربین واکنشی (فشاری) دریافت داشت که در اساس با توربینهای فرانسوی این تفاوت را داشت که آب از پهلوها به آن وارد، و به طرف محور مرکزی گردش هدایت می‌شد. این نوع توربین مرکزگرای بود که جیمز ب. فرانسیس، چند سال بعد، آن را به توربینی تغییر شکل داد که مناسب آبشارهای با ارتفاع متوسط یا پایین بود. پیدایش این توربین امریکایی در لوول[2] واقع در ماساچوست، بین سالهای ۱۸۴۹ تا ۱۸۵۵ اتفاق افتاد. لوول، مرکز مهم صنعت بافندگی در امریکا بود.

آقای فرانسیس، که مهندس شرکت Locks and Canal Co بود که از این سیستم توزیع انرژی آبی در لوول استفاده می‌کرد در سال ۱۸۴۴ دستور ساخت توربینی از نوع فورنرون را دریافت داشت که شکل پره‌ها، دریچه‌ها و توزیع‌کنندهٔ آن به توسط مهندس دیگری به‌نام آقای یورایه اترتن بویدن[3] که به آن شرکت تعلق نداشت از نو محاسبه و نقشه‌کشی شده بود. ساخت این وسیله در آن زمان بسیار دشوار بود و شمار کمی از هیدرولیک دانان می‌توانستند آن را بسازند. به‌طورکلی این سازندگان، در انتخاب شکل، به تجربه عمل می‌کردند. کارگاههای بسیاری در آن زمان توربینهای واکنشی با مدلهای گوناگونی، برحسب وسایلی که داشتند، تولید می‌کردند.

بررسیهای نظری بویدن سبب شد که فرانسیس برای اینکه بهترین راه‌حل را برای پاسخ به نیازهای کارگاههای لوول و نحوهٔ جریانهای آب که در آن زمان به تعداد زیادی چرخابهای کلاسیک پهلو ریز مجهز بودند بیابد به مراجعه به مشکل عمومی توربینها روی آورد. همکاری این دو مهندس به آنها امکان داد که طی چند سال روشی برای مطالعهٔ طرحها عرضه کنند و یک نوع توربین را که در جهان به‌نام فرانسیس شهرت یافت بسازند. جریان آب در اینجا نیز مانند مورد هاود، مرکزگرای بود. یک مخزن بزرگ آب در بالای ظرف، آب را به اطراف توزیع‌کننده هدایت می‌کرد (شکل ۸۳). در کارگاه لوول هم نخستین مدلها با دقت بسیار زیاد، هم در محاسبات و رسم نقشه‌ها، هم در ساخت پرگان و تجهیزات گوناگون اجرا شدند. پیشرفته بودن صنعت امریکا به سود ساخت توربینهایی تمام

1. Zebulon Parker 2. Lowell

۳. Uriah Atherton Boyden (۱۸۰۴ ـ ۱۸۷۹): مخترع امریکایی.



شکل ۸۳.توربین آبی امریکایی، نوع فرانسیس.
ساخت آن در اواخر سدهٔ ۱۹ است. نمای باز شدهٔ آن: روتور در قسمت پایینی دیده می‌شود و توزیع‌کننده، در شکل بالا.

شد که پس از مدتی اندک برپایهٔ اصولی که هاود، بویدن و فرانسیس گذارده بودند، رواج یافتند. انواع فراوانی از مدلها در سالهای ۱۸۶۰ ـ ۱۸۸۰ به بازار آمدند. معمولاً وسایل تجربی به‌کار گرفته می‌شدند. برای پرهیز از ناخشنودی مشتریان از طرزکار توربینها، این صنعت نوین ناگزیر روشهای خود را تصحیح، و مراکزی برای آزمایشهای فنی و کنترل تأسیس کرد.

سرانجام حدود سال ۱۸۸۰، این مدل که در جهان با نام توربین امریکایی شناخته شده و رواج می‌یافت طرح مرکزگرای جریان آب را با نوعی تغذیه از طریق سرپوش حلزونی ترکیب کرده بود، این کار سبب شد که آب در داخل (روتور)، دارای جریان محوری باشد. همین مدل است که با اشکال گوناگون خود توانست، در اواخر سدهٔ پیش، زمانی‌که ساخت تجهیزات هیدروالکتریک شروع شده بود، توربینهای فرانسوی را از دور بیرون کند.

توربین پلتون: در همین اوان نوع دیگری توربین برای کاربرد در رگه‌های معدنهای طلای کالیفرنیا ساخته شد. این توربین از چرخاب ملاقه‌دار اقتباس شده بود که در تعدادی از مناطق دارای

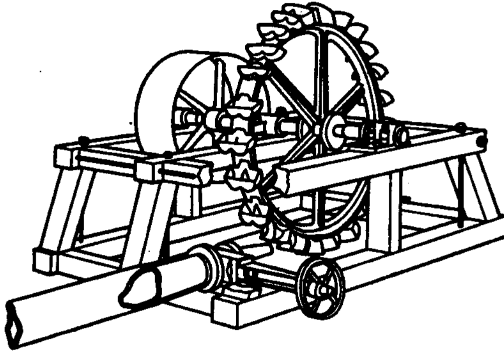
جریانهای سیلابی طی سده‌هایی به‌کار برده می‌شد. آن را با نامهای گوناگونی می‌خواندند: چرخ عرب، چرخ اهالی پیرنه، چرخ پیر(رجوع کنید به مجلد سوم، صفحه ۴۹). این دستگاه، یک چرخ ضربه‌ای بود. جهشی از آب به ملاقه‌های چوبی که معمولاً همچون قاشقهای کشیده شده به‌شکل V بودند، ضربه می‌زد تا به بهترین شکلی، در بخش کوچکی از مسیر بالاروندهٔ خود، آب خود را خالی کنند. این چرخ قاشقی، تحولی از وسیلهٔ خشنتری بود که از پره‌های مسطح و دارای میل مناسب تشکیل می‌شد و هنوز در تأسیسات کوچک روستایی تقریباً فعال است. ما در اینجا با نمونه‌ای از یک تکنیک سنتی روبه‌رو هستیم که یکباره و با شدت به یک موضوع تکنیکی تبدیل می‌شود که طی چند دهه، در دورانی که زمینهٔ تکنیکی ـ اقتصادی آن موجود است به تکامل خود دست می‌یابد.

استخراج طلای کالیفرنیا مستلزم روشهای قوی هیدرولیکی بود: استخراج خاکها و شست‌وشوی ماسه‌ها با جریانهای شدید آب. چندی نگذشت که شبکهٔ کاملی از بندهای آبی ساخته شد و تجهیزات نهرکشی در مناطق کوهستانی و هدایت آبها به‌سوی مکانهای طلادار برقرار گردید.

از سال ۱۸۵۰ این شبکه‌ها به چرخهای ضربه‌ای برای بازیابی انرژی مکانیکی مورد نیاز کارگاهها مجهز شدند. تکنیک سنتی ساخت از چوب، که سریع و اقتصادی بود، بی‌درنگ پذیرفته شد. پس از یک دورهٔ ساختهای ابتدایی دیده شد که بعضی از سازندگان که در ساخت این وسیله، خبره شده بودند برای بالا بردن بازدهِ آن کوشیدند. این کاوشهای تجربی در طرز تخته‌بندی، اصلاح شکل چرخها و پرگان و بالاخره روی شیپوره‌ها تمرکز یافت. حدود سال ۱۸۷۰ در ساخت پرگان و شیپوره‌ها، سپس چرخها و کارتر آنها به‌جای چوب از فلز استفاده شد. سازندگانی که به بهترین نتایج دست یافتند، از میان همهٔ همکاران، آقای‌لستر الن پلتون بود که پرگان دلواره لولهٔ شیپورهٔ طرح ویژهٔ وی، بازده را از ۴۰ به ۸۰٪ بالا بردند (شکلهای ۸۴ و ۸۵).

توربین پلتون از آغاز سدهٔ بیستم برای تجهیزات هیدروالکتریک در دسترس بود و به‌کار گرفته می‌شد و سرانجام در برههٔ ۱۹۱۰ ـ ۱۹۳۰ برای استفاده در آبشارهای مرتفع، همهٔ مدلهای دیگر توربین را از میدان بیرون راند.

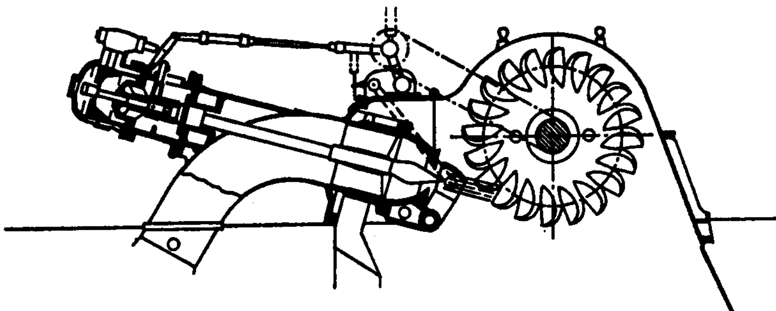
توربین پره‌ای کاپلان: در همان دوران توربینهای امریکایی اقتباس از توربین فرانسیس با رقیب تازه‌ای، که آخرین هم بود، روبه‌رو شدند نوعی توربین که آبشارهای کوتاه روی خانه‌ها و نهرهای دارای جریان آرام، کاملاً مناسب بود. این توربین پره‌ای را یک مهندس چک به‌نام ویکتور کاپلان در ۱۹۱۲ مورد مطالعه قرار داده بود. پس از اینکه جنگ جهانی درکارهایش وقفه پدید آورد، وی در



شکل ۸۴.مدل توربین پلتون (حدود ۱۸۹۰).

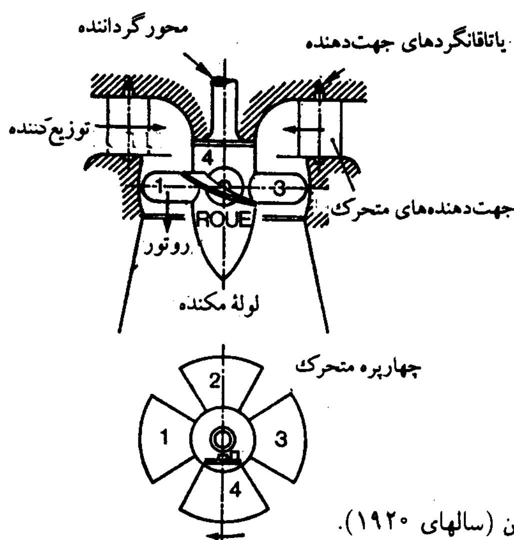
سال ۱۹۲۰ کار را ادامه داد و نخستین توربینهای او در ۱۹۲۴ ساخته شدند. روتور توربین آقای کاپلان از پره‌های حلزونی تشکیل می‌شد که جهت پره‌ها را می‌شد تغییر داد.

این کار به کمک مکانیسمی انجام می‌گرفت که در پیچ اصلی پروانهٔ آن قرار داشت و برحسب سرعت گردش آن قرار داشت و برحسب سرعت گردش آن در مراحل مختلف کار: راه افتادن، شتاب یافتن، کار عادی و سرانجام کاهش دور آن جهت پره‌ها عوض می‌شد (شکل ۸۶). آب با واسطهٔ بخش توزیع‌کننده وارد توربین می‌شد، درحالی‌که جهتگیری پره‌ها نیز تغییرپذیر بودند. این نظریه متکی به اطلاعاتی دربارهٔ توربینها و پدیده‌های جریان سیالات در اشکالی از سطوح بود که



شکل ۸۵.مدل تکامل یافته توربین پلتون (حدود ۱۹۳۰).

توجه کنید به: فرمان خودکار سوزندار، که توان جهش آب را در لولهٔ شیپوره تنظیم می‌کند.



شکل ۸۶. توربین پروانه‌دار کاپلان (سالهای ۱۹۲۰).
نمای عمودی و افقی: چرخ پروانه‌دار با پره‌های متحرک.

در آن زمان برای ساخت وسایل فضانوردی بررسی می‌شدند.

توربینهای فرانسیس که در زیر آبشارهای مرتفع و نیز مجراهای تحت فشار، از توربینهای آن زمان پلتون تندتر می‌گردیدند، در زیر آبشارهای کم ارتفاع، گردش کندی داشتند. اما این توربین جدید واکنشی کاپلان، در شرایط اخیر کاربرد، به دو یا سه برابر گردش سریعتر دست یافت.

نخستین کارخانه‌هایی که درکنار رودخانه‌های بزرگی مانند «راین» تأسیس شدند مجهز به چهار توربین امریکایی بودند تا ۳۰۰۰ اسب تولید کنند. چندسال بعد، حدود ۱۹۳۰ کارخانه‌هایی از همین ردیف با بیش از یک توربین کاپلان تجهیز می‌شدند و پنج تا ده هزار اسب تولید می‌کردند.

پس از مدت بسیار کوتاهی، قطعات دیگر توربین کاپلان و نیز پلتون را برای دستیابی به توانهای بیش از پیش بالا اصلاح کردند. از جمله آنها پذیرفتن لولۀ سوزندار شیپوره روی توربینهای اخیر بود که سبب می‌شد یک جهش استوانه‌ای به‌دست آید و پرگان دلواره‌ای که بهتر حساب شده بود به آن انطباق داده شد. این اصلاحات امکان دادند که قدرت هر واحد، طی سالهای ۲۰ دو برابر شود. مسائل دیگری در این دوره، پیش آمدند و این زمانی بود که انواع کاربرد انرژی هیدرولیک بسیار زیاد شده بود. در اینجا هم مانند مورد توربینهای بخاری، گروههای توربو ژنراتور ساخته شد که

آلترناتورها در آن، مستقیماً روی محور توربین که افقی یا عمودی گذاشته می‌شد نصب می‌شدند.

می‌بایست سرعت گردش توربین، با وجود تغییرات بار برقی، ثابت بماند و زمانی‌که چندین گروه مولد بین خود کوپل می‌شوند، کار تنظیم چهرهٔ دیگری خواهد داشت. رگولاتور کلاسیک گلوله‌ای وات بکلی کنار گذاشته شد و فرمان به شیرآلات که مقدار بده جریان آب را تنظیم می‌کرد، با سروموتورهایی انجام گرفت. سیستمهای مرتبط‌سازی به یکدیگر به کمک تکنسین‌ها پیوسته کاملتر می‌شد تا تقویت و توزیع بار برقی، نه‌تنها چند گروه از یک کارخانه بلکه گروههای چندین کارخانه و گاهی حتی چند کارخانهٔ متفاوت برای تولید یک جریان متناوب با فشار ثابت، علی‌رغم تقاضای شبکه، با یکدیگر مرتبط شوند.

انرژی هیدرولیک: از سده‌های پیش از پیدایش برق، برای نگاهداری آب، در دره‌های عمیق یا در دشتها سد می‌بستند. این سدها همیشه کم‌اهمیت هم نبوده‌اند، مثل سدهایی که برای جریان آب گرداننده آسیاهای سنتی به‌کار گرفته می‌شدند. نیاز به تولید برق بوسیله انرژی جریان آب سبب شد که تکنیکهای ساخت سدها از بن تغییر کنند.

در واقع اهمیت آبشارها به‌عنوان منبع یک انرژی جدید، از همان زمان به‌کار افتادن نخستین توربینهای فورنرون آشکار شد. در تمام مدتی که انتقال انرژی از طریق وسایل مکانیکی انجام می‌گرفت. این تأسیسات محلی بودند. منبعی از آب با ریزش آب خود، توربینی را می‌گردانید. آقای فورنرون در سال ۱۸۳۷ آبشارهایی با اختلاف سطح ۱۰۰ متر را با توربین مجهز کرد. در فرانسه، در نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم، آقای آریستید برژس مبشر کاربرد عاقلانهٔ چیزی شد که وی آن را برای نخستین بار زغال سفید نامید. آقای برژس بود که مفهوم تجهیز یک سیستم کامل هیدرولیک را با منحرف کردن آبهای موجود، با ساختن مخازن آب، با بالا بردن جبههٔ یک مخزن طبیعی و با سوراخ کردن کف دریاچه با ایجاد یک تونل برای استفادهٔ حداکثر از آب ذخیره شده، با هدایت آب بوسیلهٔ مجراهایی به‌سوی توربینها، مشخص ساخت.

آقای‌برژس که در حوالی لانسی[1] در ایالت ایزر، برای راه انداختن آسیاهای کاغذسازی یک سیستم هیدرولیک را مجهز ساخت، نوعی توربین افقی کنشی (ضربه‌ای) را طرح کرد که روتور آن یک دیسک چدنی بزرگ بود که طوقهٔ حامل کاسه‌ها آن را احاطه کرده بود. این نخستین باری بود که آب در چندین کارخانه در عمقهای مختلفی از دره مورد استفاده‌های مکرر قرار می‌گرفت.

عمل تبلیغی مهیج وی مدت بیست سال ۱۸۶۹ ـ ۱۸۸۹ دنبال شد و در پایان چند دردسر قضایی در انتظار وی بودند زیرا، آیین‌نامه تنظیم استفاده از جریان آب را مراعات نکرده بود. وی

1. Lancey

گرچه هیچ وسیلهٔ فنی تازه‌ای مطرح نکرده بود در بعضی از نشریات، اصطلاح زغال سفید را وارد کرد، که در سالهای ۱۹۲۰ به نیروی کارآمدی اشاره داشت که برنامهٔ آن در دست تدوین بود.

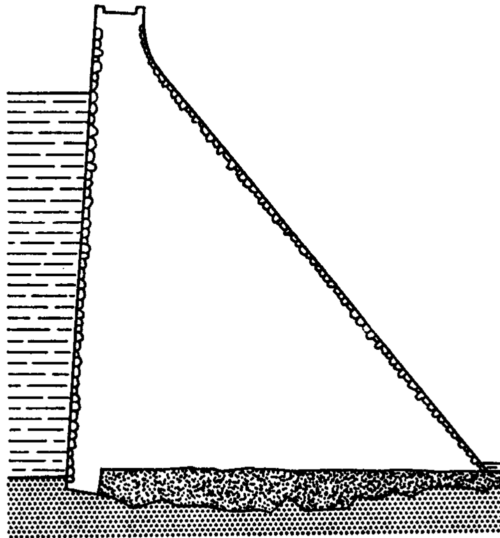
ساخت تجهیزات هیدروالکتریک در سالهای ۱۸۹۰ و ۱۹۰۰ آغاز شد و در شروع کار، سرمایه‌گذاری بسیار اندکی بدان تخصیص یافت. تنها بدین دلخوش کرده بودند که مخازن متناسب با توان موجود در محل کمترین آب رودخانه را بسازند. از آنجا که جریان آبهای کوهستانی مطرح بود که مقدار آن بین ماههای ذوب شدن برف و ماههای دیگر، بسیار تفاوت می‌کرد، اضافه توان موجود در این چهار ماه بین کارخانه‌های الکتروشیمی یا الکترومتالورژی فصلی توزیع می‌شد؛ این کارخانه‌ها در بقیهٔ سال تعطیل بودند.

از آنجا که توانهای رسمی بسیاری از کارخانه‌ها، به دلایل اقتصادی، از توان دردسترس در محل کمترین آب رودخانه کمتر بود برای تأمین حداکثر برق در زمان لازم، از نیروگاههای حرارتی کمک می‌گرفتند. در همین دوران است که این نظر پیدا شد که مراکز هیدرولیک، قاعدهٔ نمودار تولید برق را تأمین می‌کنند، نظری که در فرانسه چندین دهه جان سختی کرد و تا سالهای ۲۰ محترم شمرده می‌شد. درکشورهای دیگری که از سیستم هیدروگرافی خوبی برخوردار بودند، مثلاً در اروپا، سویس، سوئد و نروژ، تولید برق آبی بسرعت توسعه یافت و تا حال هم پاسخگوی همهٔ نیازهاست. و نیز تعدادی از آنها، مثلاً دو کشور آخر، ناچار بودند که از نیروگاه حرارتی نیز کمک بگیرند، که علت آن شرایط جغرافیایی است که مناطق بسیار شهری شده را بیرون از قلمرو برق آبی گذارده‌اند. پس از جنگ جهانی دوم، زمانی‌که مشکلات حمل‌ونقل به مسافتهای دور برطرف شد، توانستند به‌اصطلاح کل نیازها را با برق آبی تأمین کنند و برق را به خارج ازکشور نیز صادر کنند.

در امریکا، تولید ممالک متحده نیز به دو بخش تقسیم شده بود. منابع عظیم آبی، تنها در سالهای ۱۹۳۰ اهمیت یافتند. تولید برق حرارتی همواره در سطح پایینی بوده است. ازکوششهای وسیعی که روسیه شوروی، از نخستین نقشهٔ پنج‌ساله، از خود نشان داده است یاد شد. این نتایج بیشتر در سایهٔ پیشرفت تجهیزات هیدروالکتریکی به‌دست آمد.

سدها: بی‌شبهه باید پذیرفت که نیازهای مربوط به تولید برق جدید، در سالهای ۲۰، تکنیک سدسازی را تغییر داد. طرحهای بزرگ سدسازی درکوهستان و دشت در همه کشورها آغاز و طی دو دهه میان دو جنگ جهانی به اجرا درآمدند.

نخست برای برقراری مخازن بزرگ آب، تنها با یک نوع سد آشنا بودند، سد وزنی، که منشور عظیمی از مصالح ساختمانی بود که دربرابر فشار آب می‌ایستاد. نخستین سدی که شکل آن از نظر



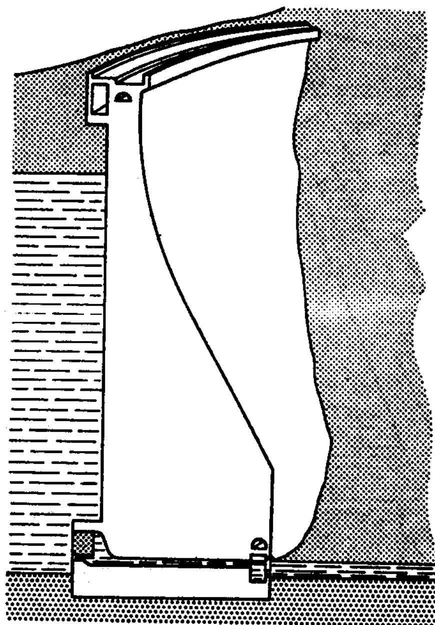
شکل ۸۷.سد وزنی.

ریاضی بررسی شد، سدی بود که در سالهای ۱۸۶۱ ـ ۱۸۶۶ برای آبرسانی به شهر سنت ـ اتین، در فوران ساخته شد. برپایهٔ نظریهٔ تازه‌ای در آن زمان: Solide d'égale résistance [۱] (دیوار با مقاومت برابر)، توانستند عرض قاعده‌ای را که استحکام کافی به سد می‌دهد و راهروی باریک بالای سد و نیز جبهه‌های منحنی پیش و پس متناسب با آن را حساب کنند. اصلاحات پیاپی در سدسازی در حوالی سال ۱۹۰۰ منجر به ساخت نوعی سد وزنی شد که در سراسر جهان آن را سد فرانسوی نامیدند و در سال ۱۹۲۳ به سد مثلثی انجامید (شکل ۸۷). خصوصیتهای پایداری قوسها، که از هزاران سال پیش برای ساختمان شناخته شده بودند از همان اوایل در ساختمان سدها مورد استفاده قرار گرفت. فشار آب بر کناره‌ها گزارش شده‌است. یکی از کهنترین بناهای از این نوع، سد زولا،[۲] بود که در سال ۱۸۴۳ نزدیک اکس ـ آن ـ پرووانس[۳] ساخته شد.

تعویض مصالح ساختمانی بابتون، نخست در ممالک متحدهٔ امریکا، سبب زیاد شدن سدهای قوسی شد که با بستن دره‌های تنگ بخوبی سازگار بود. سدسازان امریکا در برپا کردن این نوع سدها بزودی استاد شدند و بعدها از این تکنیک برای بستن دره‌های نسبتاً عریض استفاده کردند

۱. شکلی که فشار وارد بر آن، در همهٔ نقاط به‌طور برابر تحمل می‌شود. ـ م.

2. Zola 3. Aix-en-Provence



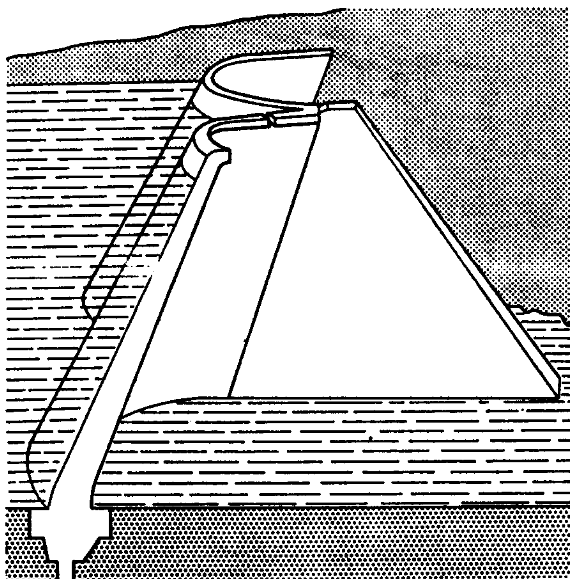
شکل ۸۸.سد قوسی.

(شکل ۸۸). ساخت سدهای قوسی پس از مرحلهٔ آزمایشی، در سال ۱۹۲۰ در فرانسه برای تأسیسات هیدروالکتریک در کوهستان پذیرفته شد. در این نوع سدها از تودهٔ عظیم مصالح که در ساخت سدهای وزنی لازم است، پرهیز می‌شود.

وانگهی، این کار در دورهٔ نخست نوآوری، با چند اقدام در جهت سبک کردن سد بود که در آن زمان گفت‌وگوی فراوان به‌دنبال داشت. با این‌همه، عمل تخلیهٔ و پشت‌بندیها، زمانی‌که وسایل سدسازی مطمئنتر شدند فواید خود را آشکار ساختند. (شکل ۸۹). در فرانسه، بهترین دستاورد این روش، سد روزلان[1] است که در سال ۱۹۶۱ به پایان رسید.

پس از اندک مدتی، کار سدسازی در اثر زیاد شدن شکلهای آن و در سایهٔ کاربرد بتون مسلح، بسیار انعطافپذیر شد. قوسها و پشت‌بندیهای متعدد، راه‌حل ساخت سدها در هر نقطهٔ مورد نظر شدند. بحث و گفت‌وگو دربارهٔ سدسازی در سالهای ۵۰ همین سده تا آنجا پیش رفت که ادعا شد که کاربرد قوسهای باریک، که صرفه‌جویی در مصالح است، چنانچه شکل قوس بدقت محاسبه

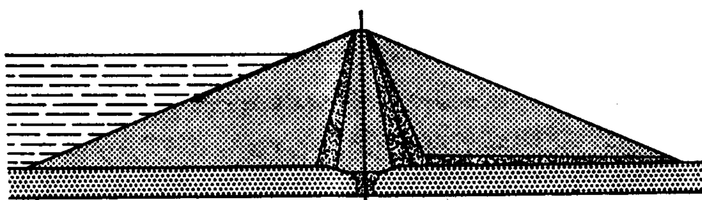
1. Roselend



شکل ۸۹.سد دارای چندین قوس و پشت‌بند.

شود، خطری ندارد.

پیشرفتهای سدسازی با بتون موجب رها کردن بعضی تکنیکهای سنتی هم نشد. سدهای سنگی زیرآبی، که از تکنیک ساخت بندهای دریایی اقتباس شده بودند و نیز سدهای خاکی (شکل ۹۰)، که مثل سدهای پیش، یک نقاب مرکزی نفوذناپذیر از خاک رس متراکم، که حتی درپیها هم وارد می‌شد، داشتند ـ هربار که ضرورتهای اقتصادی ایجاب می‌کرد ـ جای خود را به



شکل ۹۰.بند خاکی با نقاب مرکزی نفوذناپذیر.

سدهای وزنی، برای بستن مخازن بزرگ آب یا آبشارهای کوتاه، می‌داد. نخستین بند بزرگ خاکی، در سال ۱۹۱۲ در پاناما ساخته شد. این تکنیک در سالهای ۳۰ برای تنظیم و استفاده از جریانهای وسیع آب تکمیل شد. از جمله سدهای بزرگ ساخته شده در این دوره می‌توان از سد هوور روی رودخانهٔ کلرادو و نیز رشته سدهای مشهور درهٔ تنسی نام برد. پس‌از این‌کارها، سدهای بزرگ دیگری از این نوع ساخته شدند، از قبیل سد سر ـ پونسون[1] در فرانسه که در سال ۱۹۶۱ به پایان رسید و نیز سد آسوان در مصر، در سالهای ۱۹۶۰ ـ ۱۹۷۱.

پس از اندک مدتی، در سال ۱۹۳۰، نارسایی مخازن آب برخی سدها را در فصول خشک و در ساعتهای بیشترین مصرف، با اتصال چندین مخزن واقع در ارتفاعات مختلف و نیز با تلمبه‌زنی، در ساعتهای کمترین مصرف، مخزن پایینی در مخزن بالایی جبران می‌کردند. شبکه‌های واقعی آبرسانی در سالهای ۵۰ در مناطقی، به‌شکل بالا مصنوعاً ایجاد شد.

تأسیسات فنی ضمیمه: تکامل شکل سدها و نیز مصالح ساختمانی آنها تنها عواملی نیستند که انگیزهٔ پیشرفت این تکنیکها در ۵۰ سال اخیر بودند. تأسیسات فنی ضمیمه برای استفادهٔ بهینه و خزینه شدن کافی آب در سد، چه بتونی و چه خاکی، اهمیت بسیار دارند. بتدریج که سدسازی عملی جسورانه‌تر و پرشکوه‌تر می‌شد و مفهوم کارخانه‌ها تغییر می‌یافت، مشکلات مربوط به دریچه‌ها، انشعاب آب، کارهای مربوط به تخلیهٔ و وسایل خارج کردن آب اضافی، هریک به نوعی باید اصلاح می‌شدند. بدین‌ترتیب، با مجموعهٔ پیچیده‌ای سروکار داشتند و کل واحدی از علم و عمل جدید تشکیل شد که در مدت پیاده کردن برنامه‌های تأسیسات هیدروالکتریکی که در برههٔ بین دو جنگ جهانی شروع شد تقریباً در همه‌جا در پایان سالهای ۶۰ به اتمام رسید، کمال یافت.

وسایل تحقیقاتی تازه‌ای برای این نیازمندیها باید اختراع می‌شد. کار تحقیق در هیدرولیک طی سالهای ۲۰ و ۳۰ حالت تجربی گرفته بود و آزمایشگاههای ویژه، این کار را روی مدلهای کوچک شده، مثلاً نیمرخهای مجرای ریزش آب اضافی سد یا کانالها تخلیه انجام می‌دادند. رشتهٔ زمین‌شناسی نه‌تنها در این تحقیقات شرکت داشت، بلکه کار بررسی مناطق، ساختار آنها و خراب شدن احتمالی و نیز ترمیم آنها را عهده‌دار شد. اهمیت مهار کردن در حقیقت بسیار زود به‌عنوان یکی از شرایط اساسی پایداری سد، آشکار گردید. تکنیکهای بررسی خاکها را نیز از رشته‌های دیگر به یاری خواندند و به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار دادند. آقای ا. کواین[2] یکی از پرآوازه‌ترین و بهترین کارشناسان این رشته، در سال ۱۹۳۰ توانست بنویسد: «وسایل شناخت به‌طور فوق‌العاده‌ای پیشرفت و تکامل یافته‌اند: گمانه‌زنهای مته‌ای، الماسی، ساچمه‌ای، چکشهای بادی که برای تجربه

1. Serre-Ponçon 2. A.Coyne

و پیشرفتهای به‌دست آمده در کارهای معدنها مؤثر بوده‌اند به چنان درجه‌ای از قدرت و تکامل رسیده‌اند که هیچ زمینی نیست که آن‌را نتوان کاوید، تحت آزمایش بازآوایی قرار نداد و حتی همهٔ جهات آن را ندید . . . کار تزریق سیمان پیشرفتهای جالبی ایجاد کرد. اکنون می‌توانند شکافهای موجود در زیرزمین، تا عمق چندین صدمتر را پرکنند و زمینهای آهکی رسی و ماسه سنگی سست را که، تاب فشار یا رخنهٔ کردن آب را ندارند محکم سازند؛ بندهای خاکی را با موفقیت تزریق کنند و تراوشهای سد را که در هر ثانیه چندین مترمکعب آب را هدر می‌دهند کور سازند.

بدین‌ترتیب، می‌توان بتونهای ترک یا حفره‌دار را احیا کرد؛ آبرفتها را با تزریق بتون محکم و رخنه‌ناپذیر و دارای بهترین کیفیت ساخت.»

از آنچه گفته شد می‌توان از وسعتی که تکنیکهای جانبی و لازم برای ساختن تأسیسات هیدروالکتریک رفته‌رفته به‌دست آورده بود تصوری داشت.

اکثریت سدهای بزرگ جهت تأمین تغذیهٔ کارخانه‌های هیدروالکتریک ساخته شدند. اما شمار زیادی از آنها فرصت یافتند که آبیاری مناطق بزرگی را تأمین کنند و سبب غنای کشاورزی باشند. بدین‌ترتیب، نخستین هدف اولیه، بهره‌گیری از انرژی هیدرولیک، آیا در بخشهای متعددی، پشت سرگذاشته نشده بود؟ دیده می‌شود که تولید برق، نقطهٔ مرکزی دایرهٔ گسترده‌ای از پیشرفت شده است که تکنیکهای بسیار زیادی بدان وابسته‌اند.

نخستین کارخانه‌ها: باید به تنوع اشکال سدها، گوناگونی خود کارخانه‌های برق را نیز افزود. در نخستین تأسیسات انرژی هیدرولیک، توربین از طریق چرخدنده‌ها و تسمه‌هایی دستگاهها را می‌گرداند.

بنابراین توربین باید فاصله چندانی با ماشینها نداشته باشد. لاجرم، کارخانه‌های هیدرودینامیکی باید در دامنهٔ مخازن آب و گاهی دور از آن، در محل مناسب برای ساختن بناها با وسایل در دست‌رس برای تعمیرات ماشینها و مواد خام و فراورده‌های ساخته شده تأسیس شوند. تغذیهٔ توربین با لوله‌های دارای آب تحت فشار پایین رونده، به طول چندین صدمتر از مخزن انجام می‌گیرد. این نوع تأسیسات بود که در دوران اول برای بهره‌گیری از آبشارهای مرتفع یا متوسط به‌کارگرفته شدند.

اما تغذیهٔ گروههای توربو ـ آلترناتورهای بیش از پیش نیرومند، مستلزم ساخت لوله‌های با قطر بزرگ بود تا ورودی آب زیاد را تأمین و فشارهای بالا را تحمل کنند ـ لوله‌هایی که تا آن زمان هیچ صنعت دیگری آن را تقاضا نکرده بود. در آن زمان دیده شد که در سالهای ۱۹۱۰ و بویژه ۱۹۲۰ صنعت تازه‌ای برای ساخت لوله‌های مناسب هیدروالکتریک به‌وجود آمد.

این لوله‌ها از فولاد، برای پایداری دربرابر فشار زیاد، ساخته شدند و گزینش مصالح، تکنیکی را اقتضا می‌کرد که در آن روزگار بسیار پیشرفته بود: تکنیک ساخت دیگهای بخار. بعدها جهت فشارهای متوسط و پایین و نیز قطرهای بالا از بتون مسلح استفاده شد.

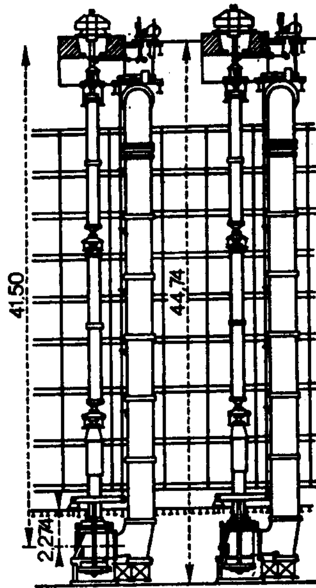
نخستین ساخت شکوهمند، تأسیسات آبشار نیاگارا در ساحل رودخانهٔ نیویورک بود. در سال ۱۸۸۹ یک شرکت مالی تشکیل شد که مهمترین بانکداران آن دوران: مورگان، وندربیلت، روچیلد از لندن و تعدادی شرکتها، مانند ادیسن و جنرال‌الکتریک در آن گرد آمده بودند. در این دوران مزایای انتقال انرژی از طریق جریان برق هنوز آشکار نشده بود و اتخاذ تصمیم برای استفاده از برق، تنها پس از مدتها بحث و گفت‌وگو عملی شد. این بحثها، انگیزهٔ گفت‌وگوهای دیگری دربارهٔ نوع جریان مورد استفادهٔ و سپس دربارهٔ چگونگی گرفتن انرژی آبی شد. ساحل رودخانه تحت پوشش قانون قرار گرفت و ناگزیر از حفر تونلی شدند که در بالا دست مخزن آب دولت، باز شود. سپس ناچار از انتقال جریان تا ۳۲ کیلومتر تا بوفالو شدند که در آن زمان ۱۵۰۰۰۰ سکنه داشت، باید گفت که ۵۰۰۰ نفر اهالی حوالی آبشار نیاگارا[1]، جهت تنها استفادهٔ از جریان مورد نظر، روشنایی، مشتریان کافی نبودند. این شرکت دست به‌کار یافتن کاربردهای دیگری در تمام منطقه، نه تنها در شهر بوفالو، شد بلکه از وجود تأسیسات شیمیایی و مکانیکی محل نیز استفاده کرد.

برای تحقیق جهت ساخت آلترناتورها از کارشناسان بسیار پرآوازه تقاضای کمک شد و سرانجام این آلترناتورها را وستینگهاوس براساس طرح جرج فوربز انگلیسی ساخت. کارخانه در سال ۱۸۹۶ انتقال برق به بوفالو را آغاز کرد و تجهیزات این کار تا ۱۸۹۹ به طول انجامید. موفقیت این مؤسسه برای نخستین بار، نمایشی از کارایی یک نیروگاه پرتوان بود که به منطقهٔ وسیعی برق می‌رسانید.

این کارخانه دارای هشت گروه ۵۰۰۰ اسبی بود (شکل ۹۱). توربینها در عمق چاهی با ۴۰ متر ژرفا گذاشته شده بودند و لوله‌های عمودی آب وارد چاه می‌شد. آلترناتورها در موتورخانه گذاشته شده بودند که در سطح بالاتری قرار داشت. اتصال آنها به‌واسطهٔ میلهای عمودی انتقال با همان طول لوله‌ها انجام می‌گرفت.

این نوع تأسیسات، که به عنوان نمونهٔ کارخانهٔ جامع همراه با مخزن تلقی می‌شد لااقل در چند جا که خاکبرداری آسان بود تقلید شد: در انتهای کانال بالا دست رودخانه بخصوص در ساحل کانادایی آبشارهای نیاگارا در سال ۱۹۰۳، و در فرانسه برای کارخانهٔ ونسا[2] در منطقهٔ پیرنهٔ شرقی در سال ۱۹۰۲ آغاز به کار کرد، که تا سال ۱۹۷۲ ادامه داشت. اما در محل کارخانهٔ ونسا، اختلاف سطح، تنها ۱۲ متر بود.

1. Niagara-Falls 2. Vinça



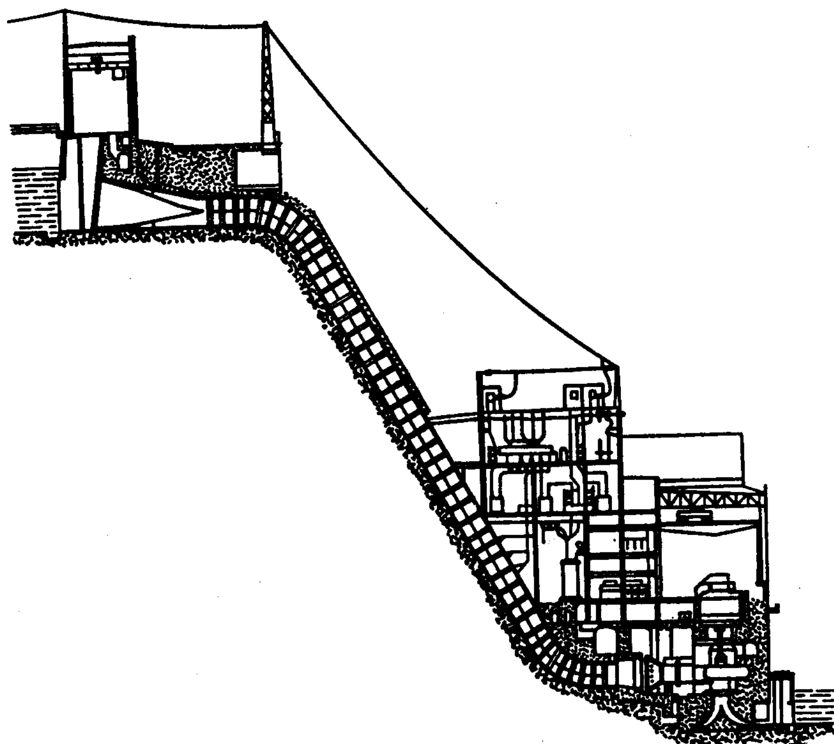
شکل ۹۱.دو گروه نیروگاه آبشار نیاگارا (۱۸۹۵).

در سال ۱۹۲۲، یعنی ۲۵ سال پس از نمونه ممالک متحده، کانادا در ساحل نیاگارا در کوینستن[1] یک کارخانهٔ جدید هیدروالکتریک برپا کرد. کانادا در این کارخانه از متداولترین طرزکار موجود که کارخانه به آبگیر مخزن بوسیلهٔ یک لولهٔ تحت فشار وصل می‌شد استفاده کرد، و گروههای توربو آلترناتور، محورهای بسیار سنجیده‌تری برای انتقال حرکت داشتند (شکل ۹۲).

کارخانه‌های آبشارهای مرتفع: در واقع، مراکزی که حدود نیم سده از تجهیزات آنها می‌گذشت، به تناسب پیاده کردن و گسترش برنامه‌ها، برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون به برق، به چنان گوناگونی روی آوردند، که انواع مختلفی از تأسیسات، بسرعت پدید آمدند. کارخانه‌های بزرگ آنها، درکمتر از ۲۰ سال ساخته شدند و بهره‌برداری را آغاز کردند. تفاوت آنها نه‌تنها به‌واسطه نوع سد، یعنی چیزی بود که شرایط جغرافیایی و آب‌شناسی آن را ناگزیر می‌ساخت، بلکه به علت محل کارخانه در پایین دست مخزن هم بود.

دیده می‌شود که در دورهٔ کاملاً اول، ساختها در دامنهٔ آبشارهای مرتفع انجام گرفته‌اند. کارخانه در فاصلهٔ کم و بیش زیادی از مخزن یا دهانهٔ سد، یا در مورد کارخانه‌های بدون سد و مخزن آب

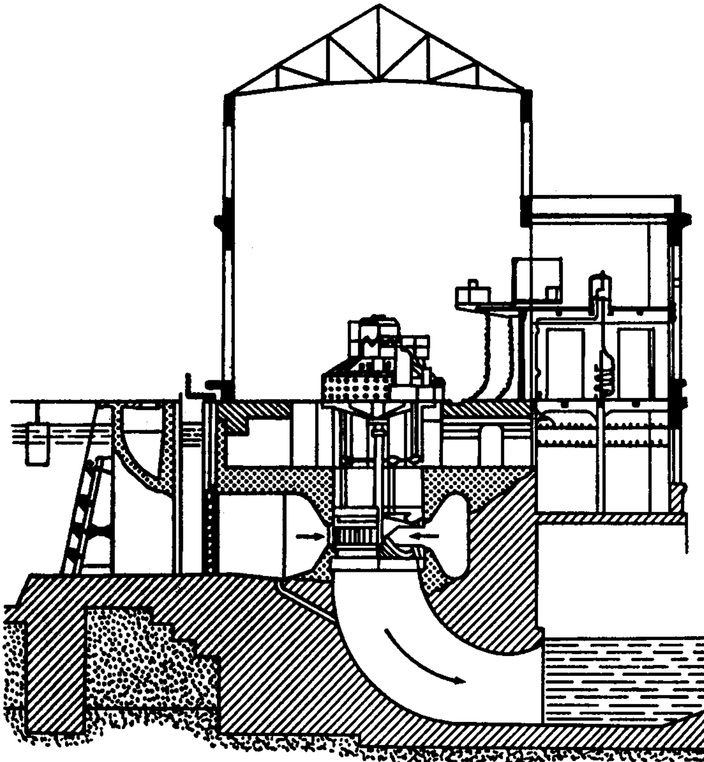
1. Queenston



شکل ۹۲.نیروگاه کوینستن، در آبشار نیاگارا (۱۹۲۲) با لوله‌های تحت فشار.

دوراز تأسیسات آبگیر قرار دارند. کاربرد لوله‌های با فشار آب، بسرعت رواج گرفت اما برای پرهیز از هزینه‌های بسیار بالا، در مواردی که فاصله به چند کیلومتر می‌رسید، نهرهای نیروگاه با شیب کم در کنار دره حفر می‌شدند و آب، به سالن توزیع هدایت می‌شد که لوله‌های تحت فشار از آنجا طبق خط دارای بیشترین شیب به سوی کارخانه روانه می‌شدند. برای استفاده از حداکثر انرژی دردسترس یک مخزن، بسرعت در طول دره، زنجیره‌ای از کارخانه‌های مرتبط با یکدیگر از طریق تأسیسات بالا دست نهر ساخته شدند. این نوع تأسیسات هنوز هم روی به پیشرفت دارد.

کارخانه‌های آبشارهای با ارتفاع کم و متوسط: برای بهره‌گیری از آبشارهای دارای ارتفاع متوسط، حدود چند ده‌متر، کوشیده‌اند تا نیروگاه سد و لوله‌های مربوط به آن را هر چه بیشتر به یکدیگر نزدیک



شکل ۹۳.نوع نیروگاه هیدروالکتریکی با ارتفاع کم آب (سالهای ۱۹۳۰).

کنند؛ و بهتر از همه اینکه بتون سد را لااقل در بخشی از کناره رودخانه ضخیم بگیرند (شکل ۹۳). در سالهای ۳۰ برای صرفه‌جویی در مصالح، بخشی از نیروگاه در دامنه سد قرار داده می‌شد؛ اما، ده سال بعد آن را تماماً در توده‌ای از بتون جای دادند. در چنین موقعیتی بود که مجراهای ریزش (آبهای اضافی) از نوع به اصطلاح پرش اسکی، ساخته شدند.

انواع دیگری نیروگاه نیز طی سالهای ۳۰، ویژه سدهای آبشارهای با ارتفاع کم، سد روی شطهای بزرگ با جریان آرام ساخته شدند. ساخت چنین سدهایی برای مقابله با شرایطی بود که در مناطق جغرافیایی دیگری وجود نداشتند: جلوگیری از تجاوز آب به دشتهای اطراف در هنگام طغیان رودخانه و مختل نشدن کشتیرانی در شط. برای دسترسی به هدف نخست، سدها را با

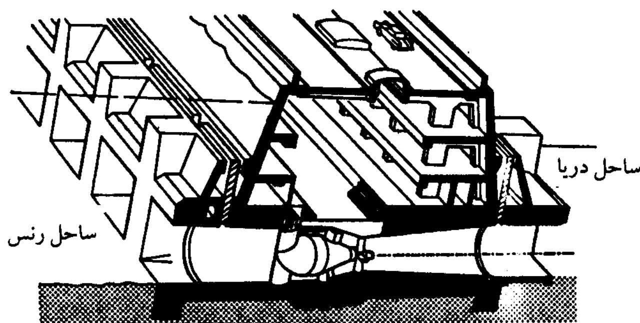
ردیفی از دریچه‌های بزرگ مجهز ساختند که آسان باز و بسته می‌شدند و از این یا آن‌سو به پایه‌های عمودی تکیه داشتند. دهانه سد، در بالا دست رودخانه، یک کانال عریض قابل کشتیرانی بود که در چندین کیلومتر دورتر به یک سد هیدرولیکی مجتمع می‌رسید که فاصله آزادی بین دیوار اکلوز و دیوار جانبی سد وجود داشت.

پیاده کردن برنامه‌های بزرگ اجراهای هیدرولیکی، جریانهای ضعیف آب و نیز آبشارهای کم ارتفاعی را که همیشه سدهای کوچک ویژهٔ گرداندن آسیابهای قدیمی با تکیه بر آنها ساخته می‌شدند، نادیده نمی‌گرفت. پیدایش گروههای کپسولی در اوایل سالهای ۵۰، استفاده از این منابع سنتی انرژی را ممکن ساخت. گروه کپسولی، سدهای کوچکی هستند که هر کدام یک توربین کاپلان با محور افقی دارند که آلترناتوری را که در یک جعبه نفوذناپذیر است می‌گردانند. این جعبه در مجرایی قراردارد که مقطع آن طوری است که واکنش آب را روی پره‌های توربین، با بهترین بازده تأمین می‌کند.

مشابه این تکنیک، اما در مقیاس بسیار بزرگتری، برای استفاده از انرژی کَشندی به کار گرفته شد. در سده‌های پیش (احتمالاً سدهٔ شانزدهم یا آغاز هفدهم) آسیابهای کوچکی روی جریان پایینی چند نهر، که تا حدودی تحت تأثیر جزرومد بودند وجود داشتند. دو حوضچهٔ اکلوز موازی یکدیگر هر کدام دارای یک چرخ آسیاب بودند. مَد دریا سطح آب یکی را بالا و دیگری را پایین می‌آورد، انرژی آن به‌طور پیوسته، لااقل از لحاظ نظری، بازیابی می‌شد. این تکنیک گروههای کپسولی امکان داد تا تنها کارخانهٔ با نیروی محرکه کشندی، که هنوز در جهان یگانه است ـ یعنی کارخانهٔ مصب شاخابهٔ برتون[1] از رودخانه رنس[2] ـ در سال ۱۹۶۶ مورد بهره‌برداری قرار گیرد (شکل ۹۴). برای تأسیس این کارخانه، مصب رودخانه با دیواری به وسعت ۷۵۰ متر جبهه سد شد و مجراهایی ورود آب کشندی را از میان آن ممکن ساختند. این مجراها را با ۲۴ گروه سدهای کپسولی با طرح ویژه مجهز بودند تا به‌هنگام مد و هم در جزر دریا بتوانند عمل کنند . از سوی دیگر، برای اینکه نظمی در مقدار جریان آب در فصول مختلف سال وجود داشته باشد، آلترناتورها می‌توانند در ساعتهای کم‌آبی نقش موتور پمپ را در هر دو جهت داشته باشند. توان کلی این کارخانه ۲۴۰۰۰۰ کیلو وات است.

در موقع ساخت این کارخانه با نیروی محرکه کشندی، طرح کارخانهٔ دومی از همین نوع، اما بزرگتر بررسی شد. کارخانهٔ دوم با تکیه بر جزایر کوچک شوزه[3] می‌باید خلیج کوچک مون سن ـ میشل[4] را مسدود کند، اما به‌طوری‌که بعدها خواهیم دید، سیاست تولید برق در فرانسه در آن زمان به

1. Breton 2. Rance 3. Chausey 4. Mont-Saint-Michel



شکل ۹۴.گروه نیروگاه کپسولی با محور افقی، سد رنس.

انرژی هیدروالکتریک به دیدهٔ یک منبع کمکی می‌نگریست و پایهٔ تولید روی نیروگاههای حرارتی قرار داشت و تأسیسات هیدرولیک مکمل آنها. این طرح رها شد. مراجعهٔ دوباره به چنین کارهایی بی‌شبهه بستگی به نتایج بهره‌برداری از انرژی هسته‌ای در دهه‌های پایانی سدهٔ بیستم دارد.

شبکه‌های انتقال برق

تدوین یک سیاست تولیدی . . .: پیشرفتهای حاصل در تولید برق، معلول افزایش نیازها بود. اما این نمودار که پیوسته رو به‌بالا دارد، تنها یک پیشرفت منظم تکنیکها و تجهیزات انتقال برق، آن را تأمین می‌کند.

زمانی‌که افزایش برق صنعتی در سالهای پس از جنگ جهانی اول شروع شد، گروه تکنسین‌ها، با تخصصهای گوناگون، که امکان این پیشرفت را به‌وجود آورده بودند، خود را در برابر انبوهی از دشواریهایی یافتند که تنها می‌توانست به‌طور جمعی در سایهٔ یک تحول در طرز تفکر دربارهٔ نقش انواع گوناگون کارخانه‌ها در تدارک جریان، برطرف شود.

نخست، ما دیدیم که مشخصات جغرافیایی هر کشور، تأثیر قاطع در گزینش منبع انرژیی دارد که تولید برق، همه یا بخشی از آن است. به‌عنوان نمونه می‌توان گفت که کشور سویس به‌طورکلی از انرژی هیدرولیک استفاده می‌کند، درحالی‌که بریتانیای کبیر از انرژی حرارتی؛ و کشورهای دیگر از میان این منابع بسیار گوناگون انتخاب می‌کنند.

وانگهی در داخل یک کشور هم، مناطقی از مدتها پیش خود را بسته به بهره‌گیری از انرژی هیدرولیک کرده‌اند و فلاتهای دور از کوهستان به انرژی حرارتی. این استدلال که اکنون به‌نظر

ساده‌لوحانه است واقعاً لااقل در دهۀ نخست سدۀ ما، خود را به بیشتر کشورهای صنعتی تحمیل کرده بود. تنها در سالهای ۲۰ بود که نظرها روی به تغییر گذاشت. مورد فرانسه امکان می‌دهد بفهمیم که چگونه طی ۲۰ یا ۳۰ سال، سیاست عمومی تولید و انتقال برق، شکل گرفت و در هر کشور بسرعت تکامل یافت و اینکه در اکثر این کشورها نسبت انرژی هیدرولیک به انرژی حرارتی واژگون شد.

دیده شد که مؤسسات هیدروالکتریک، لااقل در مناطق کوهستانی، زیربنای تولید برق بودند و رأس این تولید را نیروگاههای حرارتی ـ به اقتضای صنعت ـ داشتند. در گذر سالهای ۲۰ بود که معایب این سیستم هویدا شد. از یکسوی کارخانه‌های مصرف‌کنندۀ برق، دیگر اجازۀ کار کردن متناسب با فصل را به خود نمی‌دادند؛ از سوی دیگر نیروگاههای حرارتی نیز در شرایط بد اقتصادی بودند.

دیگهای بخار با فشار کم کار می‌کردند، سپس موتورها متوقف شدند و در پایان دورۀ بهره‌برداری، مراحل فعالیت سودآور نبود و تغییر مقدار تولید نیروگاههای حرارتی، بر حسب افزایشها یا کاهشهای مصرف، متضمن شرایط بد اقتصادی بود. آشکار شد که روش بهره‌برداری عاقلانه این است که نیروگاههای حرارتی بدون وقفه فعال باشند و منظماً مقداری برق با ولتاژ ثابت تولید کنند. بنابراین، گرایش به توسعۀ روابط متقابل میان نیروگاههای مختلف پدید آمد و از هیدرولیک تنها برای داشتن حداکثر انرژی در ساعتهای پرمصرف استفاده شد.

. . . و سیاست روابط متقابل: اما تحلیل انواع مؤسسات نشان داده بود که شبکه‌های نیروگاههای هیدرولیک، همۀ این امکانات را عرضه نمی‌کند. نیروگاههای مربوط به جریانهای کوچک آبی، چه در دشت و چه در کوهستان در افزایش تولید به مقدار تقاضاهای شبکه‌ها ناتوان بودند و این کار تنها در توان نیروگاههایی بود که از مخازن عظیمی تغذیه می‌کردند زیرا در دورانهای کم‌آبی می‌توانستند تراز مخزن را پایین‌آورند بدون اینکه مخزن خشک شود. به این علت، نکات دیگری را هم باید افزود: فصلهای کم‌آبی در شبکه‌های مختلف هیدروگرافی، همزمان نبودند. به افزایش تقاضا نمی‌شد بی‌درنگ پاسخ داد مگر به کمک نیروگاههای هیدرولیک که تنها بوسیلۀ لوله‌های تحت فشار، آب دریافت می‌کردند نه از طریق مجاری سرباز با شیب کم، که طی مسافتهای زیاد به محل تولید برق می‌رسیدند.

بنابراین، تولیدکنندگان برق در فرانسه از همان آغاز سالهای ۲۰ تصمیم گرفتند که روابط فی‌مابین نیروگاههای آبی، از هر نوع را عمومیت بخشند و بعدها هم همین تکنیک را در روابط متقابل

آبی ـ حرارتی توسعه دهند.

در فرانسه، مجتمعهای شهری پراهمیت و بویژه منطقهٔ پاریس، هنوز از بُرد انتقال انرژی هیدروالکتریکی بیرون بود ـ محرومیتی که مناطق مهم صنعتی مانند حوضه‌های زغال‌سنگ و معادن شمالی و نیز معادن لورن از آن رنج می‌بردند. نیروگاههای حرارتی در آنجا با سهولت زیادی ایجاد شدند زیرا زغال‌سنگ یا گازهای کوره‌های بلند در محل در دسترس بود؛ و نیز زغال‌سنگ را از راه آبی آسان می‌شد تأمین کرد.

کوششی که در فاصلهٔ میان دو جنگ برای تجهیز صورت گرفت ـ و هنوز هم ادامه دارد ـ تنها در زمینهٔ دو منبع انرژی است که در آن زمان شناخته شده بودند. در پایان جنگ جهانی دوم، تولید نیروگاههای حرارتی توانست خود را به مقدار تولید برق آبی برساند. تعادل، که تا حدودی مربوط به اجرای برنامه‌های بزرگ تأسیسات برق آبی رون، راین، روزلان، سرپونسون، کارخانهٔ رنس و غیره بود تا سال ۱۹۶۵ حفظ شد. از این تاریخ نیروگاه حرارتی بسرعت بر نیروگاه هیدرولیک پیشی گرفت و ده سال بعد، برق آبی تنها یک‌سوم تولید برق فرانسه را تشکیل می‌داد. همان‌طورکه ذکر شد، سرمایه‌گذاریهای بیش از پیش گزاف، بتدریج به مکانهای دشوارتری برای تأسیسات علاقه‌مند می‌شدند، ارزان بودن بهای نفت در سالهای ۶۰، سوختی که در نیروگاههای حرارتی به مقدار زیاد جانشین سوختهای دیگر شده بود، باعث شد که با درنظر داشتن این نکته که نیروگاههای آبی درهرصورت نمی‌توانند پاسخگوی همهٔ مصرف روزافزون برق باشند، ساخت تعدادی تأسیسات بررسی شده، منتفی گردد. «بحران نفتی» سال ۱۹۷۲، در دورانی که بهره‌برداری صنعتی از انرژی هسته‌ای، طی مدت معقولی توانسته بود پشتوانه‌ای برای تأسیسات حرارتی باشد، برای تغییر نسبت انرژی حرارتی به آبی کافی نبود.

از توزیع تا انتقال: فاصلهٔ زمانی ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۰ نیروگاههای موجود، برق را تنها در بخش محدودی توزیع می‌کردند، پس از این مدت، دوره‌ای طولانی پیش آمد که می‌توان آن را به مراحل چندی تقسیم کرد و طی آنها، نخست شبکه‌های منطقه‌ای تکامل یافتند، سپس بین شبکه‌ها روابطی ایجاد کردند و سرانجام شبکهٔ سراسری انتقال برق برقرار شد و در همان حال خطوط اتصال با شبکه‌های کشورهای همسایه‌ای ایجاد شدند.

نخستین‌مرحله، دههٔ ۱۹۲۰ ـ ۱۹۳۰ را می‌پوشاند. در این دهه، سازمانهای منطقه‌ای بین شرکتهای تولیدی به هدف تأمین بهره‌برداری بسیار خوب نیروگاهها، با تقسیم توزیع میان خود برحسب ساعتهای کم و پرمصرف، تشکیل شدند. وانگهی، آنان بدین‌ترتیب کمکهای سریع به‌بخشهای

حادثه دیده را ممکن ساختند. عملی که شرکت راه‌آهن میدی همراه با گروهی از تولیدکنندگان، قبلاً مستقل، که در گذشته از آن سخن رفت، انجام داد نمونهٔ گویای آن فرایندی است که در مناطق متعددی از فرانسه دیده شد. این سازمان تا حدی استانده کردن شکلهای جریان، ولتاژ و بسامد را پایه گذارد.

در اواخر این مرحله این بخشها به توسط یک شبکه منطقه‌ای با یکدیگر مربوط شدند. و نخستین شبکه انتقال برق فرانسه با ۱۲۰ کیلوولت را تأسیس کردند.

اتصال به یکدیگر و شبکه‌های انتقال: در سال ۱۹۳۰ ولتاژ ۱۲۰ کیلوولت برای شبکه جنوبی ـ غربی، و نیز شبکه‌ای که در آن زمان نیروگاههای گرانکوه مرکزی را با نیروگاههای منطقهٔ پاریس مربوط می‌کرد، پذیرفته شد.

مرحلهٔ دیگری در این تاریخ آغاز شد. در طی این مرحله، شبکه‌های جدید ۱۵۰ کیلوولتی ایجاد شدند اما خطوط فشارقوی نیز برای اتصال چندین شبکهٔ ۲۲۵ کیلوولتی با یکدیگر، تأسیس شدند: گرانکوه مرکزی با غرب و جنوبی ـ غربی، شبکهٔ Est و آلپها با منطقهٔ پاریس. این کار، در سالهای ۴۰ تا ۴۴ با ساخت دو شبکهٔ بزرگ مرتبط با هم ۲۲۵ کیلوولتی برای سراسر فرانسه به پایان رسید.

مرحلهٔ سوم، سالهای ۱۹۴۵ ـ ۱۹۶۵ را فرا می‌گیرد ـ دوره‌ای که طی آن وسایل تولید کلاسیک، همان‌طورکه دیدیم، متحول شد و در سال ۱۹۵۶ ازدواج با شبکهٔ انتقال نخستین گروه حرارتی هسته‌ای در مارکول انجام گرفت. در سال ۱۹۵۸، نخستین خط انتقالی ۳۸۰ کیلوولتی میان مناطق آلپها و پاریس بهره‌برداری شد و در جریان همین دوره، چندین خط انتقال ۳۸۰ کیلوولتی در سراسر فرانسه کشیده شد، درحالی‌که کار اتصال زنجیری شبکه‌های ۲۲۵ کیلوولتی تخفیف یافت.

این نوع عملیات مزدوج تقریباً در همان اوان در همهٔ کشورهای صنعتی جریان داشت؛ حتی اگر یک سازمان ملی آن را رسماً اعلام نکرده بود، یا اگر منابع انرژی مورد بهره‌برداری هم به‌اندازهٔ فرانسه متنوع نبودند. مثلاً در بریتانیای کبیر، یک کمیتهٔ مرکزی برق در سال ۱۹۱۹ ـ ۱۹۲۰ مأمور شد تا طرح یک شبکهٔ سراسری the Grid را برای ایجاد یک شبکهٔ انتقال فشارقوی بررسی کند که نخستین آنها در یک دهه تحقق یافتند.

فشار ۳۸۰ کیلوولت برای انتقال برق، که اصل آن در کنفرانس بین‌المللی برق در سال ۱۹۴۷ در لوسرن پذیرفته شد به طرحهای ارتباط شبکه‌های ملی در اروپای غربی پاسخ می‌گفت، طرحهایی که بزودی به اجرا درآمدند. اما این ولتاژ، حداکثر فشاری که می‌توانست برای انتقال در فاصلهٔ زیاد

به‌کار آید، نبود.

انتقال فشارقوی: گرایش به بالا بردن ولتاژ مقرر برای انتقال، از همان آغاز این سده برای پاسخگویی به تقاضاهای نامطمئن، فزون‌طلبی تکنسین‌ها در تحت پوشش گرفتن فواصل دور به‌وجود آمد. ممالک متحدهٔ امریکا، در جریان پیشرفتهای فنی و اقتصادی خود، که هر دو جنگ جهانی آن را بسیار شتاب دادند، به‌علت گسترهٔ زیاد سرزمین خود، در رأس این تکنیک قرار گرفتند.

استاندهٔ *Very high voltage* یا (VHV) برای ۱۱۰ کیلوولت، در کالیفرنیا در سال ۱۹۰۸ در مسافتی حدود ۲۵۰ کیلومتر عملی شد. فشارهای برق انتقالی بین ۱۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت، در مدتی کمی بیش از ۲۰ سال تغییر کرد و در خطی به طول ۵۰۰ کیلومتر از سد تولید برق هوور که روی کلرادو ساخته شده بود، فشار به ۲۸۷ کیلوولت رسید. بیست سال بعد، در ۱۹۴۵، استاندهٔ تازه‌ای با نام *extra high voltage* (EHV) برای ۳۴۵ کیلوولت تعیین شد. این ولتاژ در شرایط خوب اقتصادی، انتقال جریان متناوب به مسافتی برابر ۷۶۰ کیلومتر را ممکن می‌ساخت. در سال ۱۹۶۵ این رقم به ۵۰۰ کیلوولت افزایش یافت و تکنسین‌های امریکا، امکان گذر به ۷۰۰ و سرانجام ۱۰۰۰ کیلوولت را مورد بررسی قرار دادند.

چنین کوششهایی در کشورهایی انجام گرفت که در آنها مسألهٔ طی مسافتهای زیاد، برای ربط دادن یک شبکهٔ ملی، به واسطه جغرافیای منابع انرژی هیدرولیکی، الزامی بود. در سوئد، در سالهای ۱۹۵۰ ـ ۱۹۵۲ ایجاد یک شبکهٔ ۴۰۰ کیلوولتی شروع شد تا خطوط توزیع را در مسافتی نزدیک به ۱۰۰۰ کیلومتر، تا جنوب شبه‌جزیره، تغذیه کند. اتحاد جماهیر شوروی (سابق) به‌علت وسعت زیاد، در سال ۱۹۶۱، خطوط با فشار بالا، ۵۰۰ کیلوولت را به خدمت گرفت و کانادا که مخازن وسیع انرژی هیدروالکتریک کبک، و خلیج هودسن را در سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ تجهیز کرده بود خطی برای انتقال برق ۷۰۰ کیلوولتی در مسافت ۱۰۰۰ کیلومتر احداث کرد.

بازگشت به جریان مستقیم: از همان ابتدای سالهای ۶۰ تکنسین‌ها باید می‌دانستند که انتقال جریان متناوب با فشارهایی در این ردیف ـ زمانی‌که مسافتهای بالاتر از ۶۰۰ یا ۶۵۰ کیلومتر مطرح است ـ بیش از جریان مستقیم هزینه دارد. این انتقال بوسیلهٔ کابل هوایی انجام می‌گرفت و بهای کابلهای مسلح با مقدار اتلاف زیاد، بدلیل فشار بالا افزوده می‌شد. انتقال برق با کابلهای زیرزمینی با تکنیک حفر سریع و اقتصادی کانالها که آزمایش خود را در تأسیسات لوله‌کشی برای انتقال گاز و نفت داده بود، برای جریان متناوب با فشار بسیار بالا عملی نبود، بنابراین، جریان مستقیم مطرح شد که روغنهای عایقکاری را هم فاسد نمی‌کند. آیا باز هم می‌بایست علاوه‌بر تبدیلگر (کنورتیسور)های

گردان که از همان آغاز برق صنعتی با آن آشنا شدند، وسایل دیگری برای تغییر شکل جریان به کمک گرفت؟ وسایل فنی جدید لازم، با پیشرفت تبدیلگرهای با بخار جیوه به‌دست آمده بودند و به بهتر شدن کار یکسوکننده‌های سر و ته خط کمک می‌کردند. فرایندی که در آغاز سالهای ۶۰ به‌کار گرفته شد، چنین بود: ژنراتورهای کارخانه، جریانِ متناوبی با ۳ تا ۵ هزار ولت تولید می‌کردند، ترانسفورماتورهای استاتیک آن را به جریان دارای فشار بسیار بالا تبدیل می‌کردند. یکسوکننده‌های با بخار جیوه آن را گرفته، جریان مستقیمی دارای همان فشار بیرون می‌دادند. جریان مستقیم دارای فشار بسیار بالا، در انتهای خط انتقال وارد یک موج‌ساز بخار جیوه‌ای می‌شد و جریان متناوبی می‌داد که فشار آن تا ارتفاع توزیع در یک نیروگاه ترانسفورماتورها کاهش یافته بود.

نخستین خط انتقالی جریان مستقیم، در سال ۱۹۵۴ و در سوئد برقرار شد. این خط، تنها ۱۰۰ کیلومتر را می‌پوشانید و فشار آن هنوز فقط ۱۰۰ کیلوولت بود. در اتحاد جماهیر شوروی (سابق)، در سال ۱۹۶۲ انتقال برق مستقیم با فشار ۸۰۰ کیلوولت را تجربه می‌کردند، و در ممالک متحدهٔ امریکا طرحی برای اتصال تهیه می‌شد که ۱۰۰۰ کیلومتر ساحل اقیانوس کبیر را با فشار ۷۵۰ کیلوولت می‌پوشانید. در جهان از آن پس، بررسیها و کارهای زیادی انجام گرفته است.

جریان مستقیم تنها برای انتقال فشار بالا پذیرفته نشد. در سال ۱۹۶۱، اتصالی از بولونی به لید[1] بین شبکه‌های فرانسه و بریتانیا به خدمت گرفته شد. چون این کار جز از طریق کابل زیر دریا نمی‌توانست عملی شود، از جریان مستقیم با فشار متوسط ۲۰۰ کیلوولت استفاده شد.

بر پایهٔ این نمونه‌ها می‌توان نوعی فرایند تحول تکنیکهایی را مشاهده کرد که در رشته‌های غیربرقی هم نظیر آنها وجود داشت. در این مورد، جریان مستقیم که دَهها سال بود کنار گذاشته شده بود، تنها وسیلهٔ قابل استفاده برای ورود به مرحلهٔ تازه‌ای از پیشرفت شد.

مشکلات مربوط به تنظیم و حمایت: گسترش ارتباطات شبکه‌ها و انتقال برق به مسافتهای دور، درگروی حل دائمی تعداد روزافزونی از مشکلات بود ـ مشکلات تکنیکی، نخست مثلاً برای تنظیم فشار و جریان در همهٔ نقاط شبکه. آقای بوشرو[2] فیزیکدان فرانسوی، در آغاز همین سده، پدیدهٔ توان هرتز (رآکتیف) را آشکار کرد که مربوط به اختلاف فاز ولتاژ با دورهٔ جریان متناوبی است که جهت را برای یک دورهٔ ۵۰ هرتزی، صد بار تغییر می‌دهد. فشار حداکثر، حذف می‌شود و به حداکثر در جهت مخالف باز می‌گردد، آن‌گاه تغییر شکل معکوسی را پنجاه بار در ثانیه تحمل می‌کند. برای اینکه این اختلاف فاز حذف شود باید رگولاتورهای خودکار و نیز جبران‌کننده‌های همزمانی عمل کنند.

1. Lydd 2. Boucherot

مشکل دیگر، همانا بازتاب اختلالات و کوته‌مداریهای یکی از شبکه‌ها، در مجموعهٔ شبکه‌های مرتبط با یکدیگر است. حتی در سال ۱۹۶۵ هم دیده شد که این بازتاب چگونه گام‌به‌گام پیش رفت و کار کل شبکه را، زمانی‌که نیویورک برای چند ساعت بکلی از برق محروم شد، مختل ساخت. برای جبران این آثار انتشار یابنده، نوعی رلهٔ ویژه (رلهٔ تفاضلی، رله امپدانس یا رآکتانس) به نسبتی که سیستم ارتباط شبکه تکامل یافت به‌کار گرفته شد.

عمومی شدن وسایل حفاظت با تکامل تدریجی الکتروتکنیک تجربی، که پژوهشهای نظری بیش از پیش به آن یاری می‌رسانیدند تأمین شد.

ردیفی از دیژونکتورها که با شروع توزیع جریان برق ساخته شدند و در تأسیسات برق‌رسانی، به‌کاراندازی، قطع و غیره وارد شده بودند بمنظور رفع نیازهای همه شکلها و فشارهای جریان، از تولید تا مصرف، با وسایل تازه‌ای گسترش چشمگیری یافتند. سرعت کار خط انتقال، یکی از هدفهایی بود که درپی آن بودند. در جریان مراحل پایانی تکامل شبکه‌های توزیع، هم‌چنین توانستند وسایلی را به‌کار گیرند که پس از رفع اختلالات محلی، اتصال مجدد به‌طور خودکار انجام گیرد.

تقسیم توان مؤثر یک واحد تولیدی بین شبکه‌ها، از همان آغاز، یک موضوع توافق و همکاری اداری، در سطوحی بتدریج بالاتر شد، تا آنجا که به مرحلهٔ توافق بین‌المللی کشیده شد. اما طبعاً این کار هم به نوعی سازمان فنی نیاز داشت که اصطلاح بسیار گویای آن dispatching است که تقسیم جریان تولیدی در همه کارخانه‌ها در شبکه‌های انتقالی و متناسب کردن آن با تقاضاهای متغیر مصرف را پیوسته مراقبت و تأمین می‌کند.

این کار بتدریج از مقیاس محلی، همراه با پیشرفت ارتباط خطوط، به مقیاس مرکزی رسید. وسایل ارتباطی که پیوسته تکمیل شده‌اند، از تلفن معمولی به تابلوهای علامتدهی امکان داد که دیسپاچینگها، درعین‌حال که دستورهای اجرایی را به طرف مقابل انتقال می‌دهند همهٔ اطلاعات لازم برای کار خود را دریافت دارند. این مغز یک سازمان فنی، که متمرکز است، می‌بایست در جریان دهه‌های اخیر به وسایل رویت، گرچه نموداری اما با جزئیات فراوان، شبکه‌ای که آن را هدایت کند مجهز شده باشد و ماشینهای حساب به آن امکان دهند که با هر وضعیتی مقابله کنند. بنابراین، کارتنهای یک مولد، که از یک سدهٔ پیش، حادثهٔ منفردی بوده است، در اثر فشار در آغوش برق سراسری جهان، آیا به پدیده‌ای احتمالی نور یک مجموعه، که همهٔ فعالیتها در آن باید همکاری اکید و پیوسته‌ای داشته باشند تبدیل نشده است؟

مشکل خطوط: عناصر اساسی انتقال و توزیع برق، خطوط، برای اینکه با مشخصات جریانهای مورد استفاده در دورانهای مختلف سازگار شوند تکنیک تازه‌ای را سبب شده‌اند که در آغاز برای یک تحقیق تجربی شکل گرفت اما بیدرنگ آن زمان که ولتاژ انتقالی به سطح معینی رسید نوعی تحلیل نظری چندین پدیده آن را در میان گرفت.

نخست این خطوط انتقال، صرفاً از کابلها و تکیه‌گاهها تشکیل می‌شدند. تلگراف مشکلات اولیه را حل کرد و راه‌حلهای آن، تا آن زمان که ولتاژ جریان توزیعی پایین بود باید بدون تغییری، کارا باشند. یک سیم فلزی که بازویی که در بالای دکل چوبی پیچ شده بود آن را نگاه می‌داشت. برای برقراری نخستین خطوط هوایی کافی بود. به دلایل اقتصادی، در آغاز از سیمهای فولادی به قطر چهار میلیمتر استفاده می‌شد، اما پس از مدتی اندک، سیمهای مفرغی، که رسانایی برقی آن ۹۷٪ سیمهای مسی الکترولیتی است، به‌کار برده شد.

دکلها، تنه‌های درختهای صمغی، عموماً صنوبر بودند که پس از خشک کردن، آنها را با سولفات مس یا کرئوزوت آغشته می‌ساختند تا پوسیده نشوند. انتهای این دکلها تا آن اندازه، که در خاک فرو برده می‌شدند با قطران پوشیده، یا اینکه در سیمان فرو برده می‌شدند. عمل خشکاندن و تزریق کرئوزوت، وسیله‌ای مناسب ایجاد می‌کرد. با اجرای این روشها، دکلهای چوبی عمری حدود بیست سال به‌دست آوردند.

در بالای این دکلها، بازوهای فلزی مجهز به مقره‌هایی، سیمهای برق را نگاه می‌داشتند. این مقره‌ها از استوانه‌های چینی به‌شکل مناسب خطوط تلگراف ساخته شدند. اما بعدها قطعات چینی ساخته شده با روشهای ویژه و سپس شیشه‌های تابدیده کم‌کم جانشین استوانه‌های چینی شدند. شکل مقره‌ها، سر، گلو و دامن آنها نیز بررسی شدند تا اینکه عایقی توانا میان سیم هادی و بخش فلزی تکیه‌گاه آن باشند. شکل آن بتدریج که ولتاژهای انتقالی بالاتر می‌رفت، مناسبتر می‌شد.

از همان آغاز دیده شد که توزیع شهری با خطوط زیرزمینی انجام می‌گرفت. در شهرهای بزرگ، بویژه در پاریس، یکی از شرایطی که مقررات استانده به شرکتهای دارندهٔ امتیاز تحمیل کرد، این بود که باید در کانالکشی زیر پیاده‌روها فاصلهٔ معینی از ساختمان رعایت شود. بدین‌ترتیب می‌خواستند امنیت اشخاص تأمین شده باشد اما ضمناً قدغن شد که راه‌حلهای عمومی نباید، مثل نیویورک در سالهای پس از موفقیت ادیسن، با تراکمی از سیمهای هوایی پوشیده شود. بااین‌حال، در کمونهای روستایی و شهرستانهای متوسط، توزیع برق با سیمهای هوایی ادامه یافت.

در اجرای تأسیسات زیرزمینی، نخست مفتولها و کابلهای مسی لخت را روی مقره‌های ثابت

درکانالها نصب می‌کردند. برای مقابله با خطرات احتمالی این طرزکار، درآغاز از حفاظ مختصری، پیچانیدن عایق روی کابلی که بعد از لولهٔ آهنی می‌گذشت، که راه‌حل ادیسن بود، یا رد کردن کابل لخت از لولهٔ سفالی استفاده می‌شد. اما می‌بایست به عایق کردن و حفاظت مکانیکی بهتری دست می‌زدند. همهٔ شرکتهای دارندهٔ امتیاز در آن زمان ازکابلهای مسلح دارای دو پوشش استفاده می‌کردند. کارگاههای مخصوص بی‌درنگ به تولید صنعتی آن روی آوردند. از جملهٔ این کارگاهها می‌توان ازکارگاه بلفور[1] وابسته به شرکت ماشین‌سازی آلزاس در سالهای ۸۰ نام برد.

تحول خطوط: در همهٔ دورانهای تکامل رشته برق، تکنسین‌ها بین خطوط انتقال فشارقوی ـ حتی اگر از چند هزار ولت زیادتر نبود ـ و خطوط توزیع که در اوایل کار، تنها چند متر بیش نبودند، فرقی نمی‌گذاشتند. نوع دشواریهای تکنیکی که از ابتدا مطرح شدند هنوز هم تفاوتی نکرده است و راه‌حلهای پیشنهادی بتدریج که الزامات شدیدتری در اثر فشار جریانهایی که با آن سروکار دارند تحمیل می‌شوند، منظماً تغییر کرده‌اند.

بررسیهای مهندس مونپلیه در سال ۱۹۰۸، که از آن یاد شده است نشان داد که در آن زمان تصور می‌کردند که حد طول خطوط نیرو برای بهره‌برداری صنعتی، با جریان متناوب سه فاز و ۵۰ هرتز، برای فشار ۶۰ هزار ولتی با اتصال ستاره، ۲۰۰ کیلومتر است. دشواریهای ظریف تنظیم فشار در ورودی ظاهراً برای خطوط طویلتر در این بسامد برطرف نشده بودند. یکی از اولین طرحهای انتقال در منطقهٔ رون علیا، نزدیک منطقهٔ پاریس، مسافت ۴۵۰ کیلومتر را با فشار ۱۲۰ هزار ولت، اما تنها برای فرکانس ۲۵ دور، بررسی می‌کرد. در عمل فشارهای خطوط از ۲۵ تا ۴۵ هزار ولت (با اتصال ستاره‌ای) تغییر می‌کرد و این مقادیر؛ پیش از جنگ جهانی اول، بندرت زیادتر شدند.

اما دسترسی متالورژی به برق صنعتی، وسایل تولید جدیدی ایجاد کرده بود که دقیقاً به سود پیشرفت الکتروتکنیک بود: تولید مس ناب از راه الکترولیز، از همان ابتدا، و ساخت ارزان آلومینیم، که از پایان سدهٔ نوزدهم، به فلز رایجی تبدیل شده بود.

سیم مسی یا مفرغی با رسانایی زیاد برق، در حالت کشیده شده، دربرابر فشار ۴۵ کیلوگرم بر میلیمترمربع پاره نمی‌شد، در آغاز از سیمهای تکی ضخیم با چند رشتهٔ بهم تافتهٔ متشکل از ۷، ۱۹ یا ۳۷ رشته زیاد استفاده می‌شد. در سال ۱۹۰۳ تولید کابلهای آلومینیمی آغاز شد، برای اینکه رسانایی کمتر این فلز جبران شود قطر آن را بیشتر ازکابلهای مسی گرفتند. بنابر علل مکانیکی، دراین‌صورت افزایش فاصلهٔ دکلهای حامل کابل از یکدیگر ممکن شد. اما آلومینیم تنها، نواقصی داشت: کمبود صلبیت و دشواری اتصال آن با مس. کابل آلومینیمی پس از چند سال خدمت،

1. Belfort

جای خود را به کابلهای دارای مغز فولادی واگذاشت، بخصوص اینکه کابلهایی از آلیاژهای آلومینیم به‌کار گرفته شدند که ترکیب شیمیایی آنها در آن زمان که ارتباطات شبکه‌ای تازه آغاز می‌شد، بدقت بررسی شده بود.

انواع تکیه‌گاههای دیگر، به‌دنبال افزایش فاصلهٔ دکلها از یکدیگر و نیز مقدار فشار، ساخته شدند. چوب تا مدتها به‌کار گرفته می‌شد و نخست صرفاً، به‌علت قدرت عایق بودن مخصوص خود، تنها مادهٔ مورد استفاده بود. به‌جای بازوهای فولادی گاهی از تراورسهای چوبی جهت ثابت نگاهداشتن مقره‌ها استفاده می‌شد.

طرز گذاشتن مقره‌ها در سر دکلها، طی سالهای ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۰ قواعد تجربی خود را به‌دست‌آورد ـ قواعدی که برای استقرار خطوط با فشار زیاد روی برجهای فولادی، متحمل تغییرات اساسی شد.

برجهای فولادی در شکل لوله‌ای در سال ۱۸۹۸ در ایتالیا برای خط پالرمو به میلان ساخته شدند. بُرد این برجها که با دکل چوبی ۴۰ تا ۵۰ متر بود، دراین‌صورت از ۶۰، سپس از ۸۰ متر در خط لنتسو ـ تورینو گذشت. در این زمان و سالهای پس از آن، ارتفاع برجها به ۱۵ متر می‌رسید.

با استفاده از تکنیک تیر مشبک که از نیمهٔ سدهٔ نوزدهم برای ساختن پلها رواج یافته بود، رفته‌رفته از برجهای واقعی فلزی با قاعده‌ای بسیار باز استفاده شد که با در نظر داشتن استحکام مکانیکی کابلها، به بردهای ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر دست یافتند. ابعاد، شکل و تجهیزات برجهای فلزی، زمانی‌که موضوع انتقال برق با فشاری بیش از ۲۰۰ کیلوولت مطرح شد باز تحول یافتند. این عملیات در فرانسه در سال ۱۹۴۱، یعنی سالی آغاز شد که در آن‌همه مؤسسات انتقال برق در سه شرکت دارندهٔ امتیاز گرد آمده بودند و این مرحلهٔ پیش از ملی شدن خطوط در آوریل ۱۹۴۶ با تشکیل شرکت ملی برق فرانسه Électricité de France بود. در فرجه ۱۹۴۱ ـ ۱۹۵۰ کار انتقال برق با ۲۲۵ کیلوولت انجام می‌گرفت، اما همهٔ تجهیزات برای تحمل ۳۸۰ کیلوولت پیش‌بینی شده بودند. بعضی از خطوط برق را می‌شد بدون تغییر برای ولتاژ جدید به‌کار گرفت.

در همین دوران است که برجهای دارای بازو و تراورس به‌کار گرفته شدند. این برجها، تیرهای مشبکی بودند که همهٔ شبکه‌ها را به یکدیگر مرتبط می‌ساختند و مسافتی برابر چندین صد کیلومتر را به‌هم پیوست می‌دادند. در مدت تأخیرهای تغییر شکل فشار ولتاژ، یک سر این تراورس یک خط ۲۲۵ و سر دیگر آن خط ۳۸۵ کیلوولتی را حمل می‌کرد. سرانجام پس از آغاز سالهای ۵۰، که این تجهیزات به سنگینتر شدن خود ادامه دادند برجهای پل‌مانندی ساخته شدند تا فواصل زیاد را

با ارتفاع زیاد، مثلاً از فراز دره‌ها، بپوشانند. معلوم است که ساخت این شبکه‌های انتقال برق تنها با استفاده از بعضی تکنیکهای ساختمانهای فلزی می‌توانست عملی شود، همان‌طورکه در همه ادوار، ساخت همهٔ مصالح تولیدی و مصرف، دستخوش تحولی از تکنیکهای مکانیکی صنعتی و متالورژی بوده‌اند.

بتن مسلح و بتن پیش تنیده جهت ساختن دکلها، به ترتیب به‌کار گرفته شدند و هنوز هم از آنها استفاده می‌شود.

تحول دکلهای تکیه‌گاهی، طبعاً تابع تحول مقره‌ها بود. مشخصات مکانیکی و برقی آنها می‌بایست به الزامات بیش از پیش متحولی، پاسخ دهند، که با توجه به مطالب گفته شده، درک آن دشوار نیست. باز در اینجا تحول تکنیک چیزی جز دنبال کردن اطلاعات اساسی که در همان سالهای نخست بهره‌برداری به‌دست آمده‌اند، نیست؛ اما باید این نکته را در نظر داشت که زمانی‌که با چند ده هزار ولت کار می‌شود بعضی آثار ناچیز ممکن است قدرتی غیرمنتظره یابند. زمانی‌که به فشارهای ۴۵ تا ۶۰ کیلوولت رسیدند بررسیهای پیگیری آغاز شد.

یک ولتاژ اضافی اتفاقی می‌تواند مقره را در اثر جرقه زدن یک قوس بین رسانا و تکیه‌گاه فلزی، سوراخ کند. اما گرد و غبار و رطوبت متراکم شده روی سطح بیرونی مقره، طی زمان، برای ایجاد قوسی، که مقره را دور بزند، کافی است. بر آن شدند که مثلاً با توسعهٔ دامن مقره، برای جدا کردن حتی‌الامکان جریان قطرات آب از محور تکیه‌گاه فلزیش، از آن جلوگیرند. زمانی‌که عصر ولتاژهای بسیار زیاد با دکلهای فلزی تراورسدار آغاز شد، شکلهای دیگری از مقره به‌کار گرفته شدند. کابلها روی تراورسها با کمک ردیفی از مقره‌ها، که تا حد امکان کابلهای رسانا را از ساختمان فلزی برج دور می‌داشتند، آویزان نگاهداشته شدند.

رفتار خط: گرچه این تحول جمعی، در آغاز درپی تنها بررسی تجربی پدیده‌هایی بود که تکنسین‌ها طی نخستین دهه‌ها با آنها روبه‌رو شده بودند، این تحول نمی‌توانست از آستانه، فراتر برود، گرچه این تکنسین‌ها به تحلیل نظری دشواریهایی که با آن برخورد می‌کردند توانا هم نبودند.

مثلاً آزمایش مقره‌هایی که در زیر ولتاژهای بسیار بالا بودند، وجود تبخیرهایی را نشان داد که رفع آنها مستلزم بررسی تقسیم دوباره فشارها در طول سطح بیرونی است تا از عدم توازن در فضاهای کاهش یافته جلوگیری شود و تقسیم دوباره یکنواختی ایجاد شود.

همچنین در تاریکی، متوجه تصعیدهایی در اطراف سیمها شدند. تصعیدها، پدیده‌ای به نام اثر هاله‌ای ($corona\ loss$ = effet corona) را تشکیل می‌دهند و نتیجهٔ یونش هوا می‌باشند، و

می‌توان آنها را به‌طور همهمهٔ پیوسته‌ای در سراسر خط شنید. این اثر، خاستگاه اتلاف بیش از پیش زیاد سیمها، با بالا رفتن ولتاژ می‌باشد. این پدیده افزایش فاصلهٔ سیمها از یکدیگر و نیز کاربرد کابلهای لوله‌ای را سبب شد.

عوامل دیگر مؤثر در رفتار خط نیز رفته‌رفته شناخته شدند. آشکار شد که مقاومت کابل که در جریان مستقیم، پدیدهٔ ساده‌ای است، در جریان متناوب، بغرنج می‌شود. این جریان از تمام مقطع کابل به‌طور یکنواخت نمی‌گذرد، بلکه اساساً از محیط عبور می‌کند، و این حالت، مقاومت سیم را افزایش می‌دهد. تحلیل ریاضی این اثر شگفت‌آور، بررسی ساختمان فلزی مقطع کابلها را، برای محدود کردن نتایج آن، درپی داشت.

«راکتانس[1]» خط، یا پدیدهٔ خودالقایی نیز همان‌طورکه دیدیم، مربوط به اینرسی سیم در برگردانیدن جریان به تعداد پنجاه بار در ثانیه است. زمانی‌که تنها با یک کابل منفرد سروکار داریم، مشخصهٔ دیگری که از رفتارکابل نتیجه می‌شود «سوستپانس» است که نتیجهٔ جابه‌جایی الاستیکی، الکتریسیته در پوشش عایق است. بدین‌ترتیب، نوعی جریان ظرفیتی (= خازنی) ایجاد می‌شود که انگیزهٔ گرم شدن زیاد خط در اثر یک بار برقی کم است.

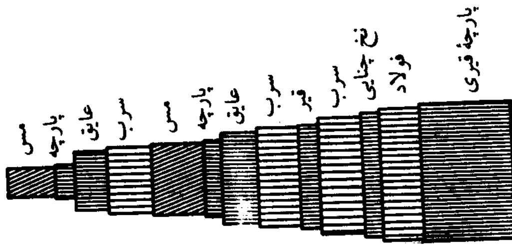
این چند نمونهٔ که در واقع شمار فراوانی از پدیده‌های دیگر می‌توان به آنها افزود در اینجا از این لحاظ ذکر شد تا میزانی از اهمیت کار نظری به‌دست دهد کاری که به‌طور گروهی به توسط کارکنان علمی همهٔ کشورهایی که در این پژوهشها تخصص دارند، در نیمهٔ اخیر این سده انجام می‌گیرد.

کابلهای عایق شده: دیدیم که خطوط زیرزمینی از همان نخستین دوره، برای توزیع برق در شهر کار گذاشته شدند و پس از مدت اندکی، عایق‌سازی کابلها به کمک مصالح موجود در آن زمان انجام گرفت. رسانای فلزی دارای یک مغز مرکزی از رشته‌های مسی درهم تابیده‌ای بود، که پارچهٔ اندود شده‌ای بدون واسطه روی آن پیچیده شده بود. نخستین لایهٔ یک مادهٔ عایق، مخلوطی از روغنهای گیاهی بعدها، روغنهای معدنی ـ و قیر بود. کابل در غلافی از سرب کشیده می‌شد تا دربرابر رطوبت هوا کاملاً محفوظ باشد، لوله سربی که نرم وکمی شکننده بود با یک ردیف پوشش عایق شبیه پوششهای قبلی حمایت می‌شد و بالاخره یک تسمهٔ فولادی آن را در خود می‌گرفت که خود آن هم با پارچه قیراندودی پوشیده می‌شد. (شکل ۹۵).

مواد عایق‌کننده به سلیقهٔ سازندهٔ کابل و نوع منابع هر دوره، متفاوت بودند. کائوچوی طبیعی، سپس رزینهای مصنوعی و یک ردیف تمام از فراورده‌های سنتزی از آغاز نیمهٔ دوم این سده به ترتیب به‌کار گرفته شده‌اند. اما به‌طورکلی از راه و رسم ادوار اولیه دور نشدند. این کار با احاطه و

---

۱. reactance مقاومت دربرابر عبور جریان متناوب و بخشی از امپدانس است.ـم.



شکل ۹۵.ساختار یک کابل توزیع برق (حدود ۱۸۹۰).

معرفت کامل از خواص مصالح به‌کار گرفته شده و نیز وسایل مکانیکی ساخت، که خود یک صنعت جانبی بسیار ویژه‌ای بود، انجام می‌گرفت.

کابلهای زیرزمینی برای انتقال برق دارای ولتاژ زیاد، پیش از سال ۱۹۲۰ جلوهٔ ناچیزی داشتند. هزینهٔ این کار گزاف بود و ظرفیت زیاد آنها سبب می‌شد، هر زمان که به خطوط هوایی متصل می‌شدند، ایجاد ولتاژ اضافی، و به‌دنبال آن، در نقاط زیادی، ترق‌وتروق کنند. بااین‌حال، از آنها نه‌تنها در سیستم پیشنهادی آقای توری برای انتقال جریان مستقیم استفاده می‌کردند، که مشکلات خاصی داشت، بلکه در اتصالات دارای فشارهای ۲۰ تا ۳۵ هزار ولت، ویژه صنعت نیز آن را به‌کار گرفتند. در این دوران همیشه از کاغذ آغشته به روغن معدنی و صمغ در زیر غلاف آب‌بندی شده با سرب و تقویت شده با آهن، تسمه یا سیم فولادی استفاده می‌شد. تنها سی سال بعد بود که کاغذ روغنی همه‌جا حاضر، کم‌کم واپس نشست، و تحول تکنیکهای عایق‌سازی در آغاز سالهای ۶۰، شتاب بیشتری گرفت.

عایق‌سازی در حمام روغن، که همان‌طورکه دیدیم ابتکار ادیسن، بود، نیز رواج داشت. روشهای این کار در زمان توسعهٔ زیاد انتقال برق، پیرو نوع ابزار کاری بود که تکنیک برای آن تهیه کرده بود. در زمان اخیر، برای انتقال جریان فشار قوی، از کابلهایی استفاده شده است که با گازهای تحت فشار عایق شده‌اند.

کار توزیع برق، به‌معنی دقیق آن، از نیروگاههای نزدیک به مصرف‌کننده یا پست ترانسفورماتور، به نسبتی که مجتمعهای شهری افزایش یافته‌اند، در مسافتهای بیش از پیش زیادی گسترده شده است و درعین‌حال، فشار توزیع در بخشها، آنچنان بالا رفته است. که در اوایل آن را فشار قوی گمان می‌کردند. خود خطوط انتقال، با کانالهای زیرزمینی، از موانع طبیعی یا مصنوعی رها شده‌اند،

بنابراین کاربرد کابلهای عایق شده بتدریج زیادتر شده است ـ بدون اینکه از زمینه‌های تأسیسات ویژه‌ای مانند کشتیرانی یا هواپیمایی، و ارتباطات از راه دور، بایا بدون سیم ـ که انگیزهٔ بررسی انواع کابلهای دارای مشخصات چندگانه بوده‌اند ـ سخن گوییم. برای انتقال نیرو، به‌معنی دقیق، چندین نوع کابل جهت پاسخگویی به همهٔ نیازها، پیشنهاد شده‌اند. در سالیان ۶۰ توانستند کابلهایی بسازند که می‌تواند جریان متناوب ۵۰۰ کیلوولت را تحمل کند. گرچه از این مرز، بندرت فراتر رفته‌اند، اما معلوم است که این مانع با استفاده از جریان مستقیم با ولتاژ بسیار بالاتری هم، دور زده خواهد شد.

برق صنعتی، تکنیک پیشتاز: برق یک سده پس از پیدایش، هنوز هم برترین تکنیک است. اما صنعت شیمی با اسناد اشرافیت قدیمیتر، حدود دو سده، و الکترونیک، برادر کهتر برق، در این افتخار با آن شریک هستند. آغاز آن مدیون روشن‌بینی گرام است که در شمار نوآوران منفرد است و نظرات وی بیش از نیم سده، بنیاد این دانش بودند. نخستین مراحل گسترش آن، نتیجهٔ کارهای فردی بود و از بررسیهای بیش از پیش هماهنگ نتیجه شده بود. اما اوج این شکوفایی در آغاز دههٔ دوم این سده، مرهون کارِ گروهی، با خصیصهٔ توأم عمل و نظر بود.

ساختمان وسایل، در نتیجهٔ تمرکزهای صنعتی و تأثیرهای اطلاعات فنی، علمی و اقتصادی، بتدریج طی دهه‌ها پیاپی، یکنواخت‌تر شدند. این صنعت از همان دهه‌های اولیهٔ سدهٔ ما در فهرست مهمترین صنایع گنجانیده شده و تاکنون نه‌تنها مقام خود را حفظ کرده، که به اهمیت آن افزوده هم شده است. از مشخصات این صنعت، گوناگونی فراورده‌ها، ظرافت تکنیکهای آن در رشته‌های متعدد، و طبعاً فراوانی تکنیکهای سطح بالاست. تنها صنعتی است که درکشورهای دارای اقتصاد سوسیالیستی، در قلمرو بخش خصوصی باقی مانده است. در جریان دهه‌های اخیر، مشتریان آن، لااقل در بخشهای تولید، انتقال و توزیع، تقریباً در همه‌جا به‌صورت سازمانی تقریباً رسمی برخوردار از وضعیت دولتی درآمده‌اند، و تهیه‌کنندگان می‌بایست به این نکته توجه لازم را داشته باشند.

بهره‌برداری از منابع انرژی و شبکه‌های انتقال برق به پشتوانه واقعیات یا قانون تحمیلی، مرزهای سیاسی تقریباً همه کشورهای جهان را درنوردیده، و به نوعی همکاری جهانی انجامیده است. تحلیل تحول این نوع سازمان، می‌تواند تأثیر رشد تکنیک یک وسیلهٔ تولیدی و مصرفی را در زمینه‌های سیاسی و اجتماعی بنمایاند.

سنگینی برق صنعتی روی همهٔ جنبه‌های اجتماع معاصر، همان‌طورکه دیدیم، طی دهه‌های بین دو جنگ جهانی، حس شده است. این فشار کاهش نیافته است و بدون تردید در میان تکنیکهای تولید، هماوردی جز شیمی صنعتی ندارد. این حقیقت اساسی بویژه بدین دلیل است

که با وجود دوران طویل تحول آن، این صنعت خصلت پیشتازی خود را از دست نداده است. این صنعت این مقام را تا مدتهای زیادی حفظ خواهد کرد؛ زیرا چنین نمی‌نماید که تکنیکهای تشکیل‌دهندهٔ آن به حالت سیری و اشباع نزدیک شده باشند.

کتاب‌شناسی بخش دوم

La Lumière électrique, périodique depuis 1879.
ALGRAVE (E.) et BOULARD (J.), *La lumière électrique, son histoire, sa production et son emploi*, 1882.
BLONDEL (A.) et PAUL-DUBOIS (F.), *La traction électrique sur voie ferrée*, 1898.
BOUTAN et d'ALMEIDA, *Cours élémentaire de physique*, 1842 et plusieurs rééditions.
CAZIN (A.), *Traité des piles électriques*, 1880.
DU MONCEL (T.), *Les applications de l'électricité*, 1856 et plusieurs éditions.
DUMONT (G.), *Dictionnaire d'électricité et de magnétisme*, 1889.
DUNSHEATH (P.), *A History of electrical Engineering*, 1962.
GEORGE (P.), *Géographie de l'électricité*, 1973.
JOSEPHSON (M.), *Edison*, 1959.
KING (W. J.), *The Development of Electrical Technology in the 19th Century*, United States National Museum, Bull. 228, 1962.
MARÉCHAL (H.), *L'éclairage à Paris*, 1894.
MONTPELLIER (J. A.) et HOSPITALIER (E.), *L'électricité à l'Exposition de 1900*, 1902.
MONTPELLIER (J. A.), *Les dynamos*, 1897.
NIAUDET, *Machines électriques à courants continus*, 1881.
SARTIAUX (E.) et ALIAMET (M.), *Principales découvertes et publications concernant l'électricité*, 1903. A utiliser avec précaution.
SHARLIN (H. I.), *The Making of the Electrical Age, from the telegraph to automation*, 1963. Succinct et confus.
THOMPSON (S. P.), *Courants polyphasés et alterno-moteurs*, 1896.
THOMPSON (S. P.), *Traité des machines dynamo-électriques*, 1894.
WOODBURY (D. O.), *Elihu Thomson, Beloved Scientist*, 1960.

بخش سوم

صنایع بزرگ شیمیایی

۱

تحول روشهای کلاسیک

در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم، صنعت شیمی، بدون اینکه پایه‌های فنی آن از وضع اولیهٔ خود، چندان دورتر رفته باشند، چهرهٔ صنعت سنگینی را یافته بود. در واقع می‌توان ادعا کرد که هم روشها و هم وسایلی که در صنعتی کردن تولیدهای بزرگ کربنات سدیم و اسید سولفوریک به‌کار گرفته شدند با آنچه که در کارگاهها یا تولیدکنندگان خرده‌پای سدهٔ پیش به‌کار می‌رفتند، تفاوت اصولی نداشتند.

برتری عملگران: نوآوریها، ثمرهٔ آزمودگی در به‌کارگیری راههای هوشمندانه است. نوآوری، توجهی به دانشهای تازه ندارد. اطاقهای سربی، پیش از نفوذ اصول شیمیایی لاووازیه وجود داشته است. روشهای لوبلان، اساساً عملیاتی از نوع تجزیهٔ مضاعف با خصلت سنتی بوده است. این صنعت، گرچه تازه پدید آمده بود، ادامهٔ یک زنجیرهٔ تولیدها بود. تعمیم اطاقهای سربی و بعد تکمیل این روش، دلیلی جز افزایش نیاز به اسید سولفوریک نداشت. عملیات سودسازی لوبلان، نخستین نیاز به اسید سولفوریک را موجب شد و تولید اسید سولفوریک را از مقیاس آزمایشگاهی به تولید برای مصرف عظیم، متحول ساخت.

اسید سولفوریک که با بهای ارزان در دسترس قرار گرفت، پس از مدتی بسیار کوتاه وارد

چرخه‌های دیگر تولید شد و صنایع بزرگ معدنی، که در میانهٔ سدهٔ نوزدهم، کاملاً سازمان‌یافته و مستقر می‌نمودند، قد برافراشتند.

طبعاً پیشرفتهای دانش شیمی در این نخستین تحول، کاملاً بی‌اثر نبوده‌اند. زبان مشترک و بیانی که همه‌جا نفوذ کرده بود، درک واکنشهایی را که در تولیدهای صنعتی به‌کار می‌رفتند، آسان می‌ساخت. این امر جهتیابیهای آزمایشی را تسهیل کرد، انواع تجربه‌ها، گزینشها و اتخاذ تصمیمات مستدل را ممکن ساخت. این زبان بویژه به نفوذ هرچه سریعتر دستاوردهای فنی خدمت کرده است. مفاهیمی، بویژه مربوط به کاتالیز، بخوبی بیان شدند. همهٔ اینها در سرگذشت اسید سولفوریک مندرج است، و نیز در تاریخ سود مصنوعی، که هنوز همه‌چیز آن، تجربی مانده بود؛ حتی در بیشتر کتاب بزرگ *Traité de la fabrication de la soude* نوشته ژورژ لونژ[1]، که بهترین کتاب تکنولوژی شیمی در بیست سال پایانی سده نوزدهم به‌شمار می‌رود، این حالت بیشتر به‌چشم می‌خورد.

فراوانی نسبی اسیدهای معدنی به پیشرفت صنعت فراورده‌هایی که از مواد جانوری و گیاهی استخراج می‌شدند کمک کرد و پیشرفت صنعت اخیر نیز همراه با پیشرفت صنایع معدنی، در تحول صنایع شیمیایی در اواسط سدهٔ نوزدهم، یک عامل اساسی بود بهتر کردن مواد آلی، شاخهٔ مهمی از صنعت شیمی سنتی شده بود. صفت جدید بودن، تنها از این لحاظ به آنها اطلاق می‌شد که شماری از فراورده‌های جانشینی، مانند قندچغندر، گاهی با بهای کمتر و کیفیت بهتر، مانند شمعهای استئاریک، پس از رفع دشواریهای مربوط به تولید صنعتی، مشتریان بسیار فراوان داشتند.

دستاورد دانش شیمی در این شاخه بسیار نابرابر بود. این دستاورد دربارهٔ چغندرقند، کائوچو، صفر بود و در ساخت شمعهای استئارینی، زمانی‌که مناسب کردن ترکیبات سلولوزی آغاز شد، بسیار اساسی.

ابتذال دستگاهها: قبل از هرچیز، تکمیل آرام دستگاهها بود که گوناگونی فراورده‌ها را ممکن ساخت و فراورده‌های جدیدی به بازار آورد که هیچ چیز اصیلی در آنها دیده نمی‌شد و هنوز قابل استفاده نبودند؛ زیرا فراورده‌هایی که از آنها به دست می‌آمد فروش بازرگانی نداشتند. مثلاً مورد تقطیر چوب را بررسی کنیم. آقای فیلیپ لوبون، همان‌طورکه دیده شد، سودی که از فراورده‌های تقطیر خشک چوب برای صنعت در آینده متصور بود بروشنی درک می‌کرد. برخیها خواسته‌اند وی را، لااقل در فرانسه، مخترع گاز روشنایی بدانند، که یک خطای تاریخی است. تنها آزمایش وی برای کاربرد گاز چوب بمنظور روشن‌سازی خانه‌ها، علی‌رغم ثناگویان سدهٔ نوزدهم، به شکست انجامید. این آقایان توجه نکرده‌اند که اختراع لوبون تنها از لحاظ فراورده‌های مایع و جامدی اهمیت دارد که از تقطیر

1. G.Lunge

خشک چوب به‌دست می‌آیند. اما سالهای نخستین سدهٔ نوزدهم، مهارت در ساخت دستگاههایی که بتوان با آنها کارهای سودآوری انجام داد هنوز در سطح بسیار ابتدایی بود.

فراورده‌هایی که با هزینهٔ سنگین گردآوری شده بودند درگودالی از وسایل بسیار پیچیده سقوط می‌کردند که انگیزهٔ ساخت آنها چیزی جز ارضای کنجکاوی نبود. تهیهٔ اسید استیک از سرکهٔ تخمیری با روش اورلئان، برای مصارف کوچک، بیش از تهیهٔ آن از راه تقطیر خاک اره در دیگهای بخار و قرع و انبیقها رواج داشت.

در آغاز نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم، وضع تغییر یافت. دستگاههای شیمی صنعتی، کمتر جنبهٔ صنعتگری داشتند. به‌علت نیازمندیهای صنایع در نیمهٔ نخست این سده، صنایع پررونق عبارت بودند از: سود کربناتی و مشتقات آن، اسید سولفوریک و دیگر اسیدهای معدنی، که هنوز یک فراوردهٔ جانبی مزاحم تلقی می‌شد، ساخت شمعهای استئارینی، قند چغندر، و بالاخره، گاز روشنایی. ساخت این مواد، یک کار تخصصی بود. تکنیکی مطمئنتر برای ساخت بخشهای مصالح ساختمانی، اجسام نسوز، سفالگری به‌دست آمده بود. تولید لوله از سفال، چدن و حتی از فولاد در صنایع تخصصی انجام می‌گرفت. دیگهای بخار، ناقوسها، مخازن آب، ستونهای فلزی ستبر، مارپیچی یا صاف جذب یا تقطیر، هنوز در صورت تقاضا ساخته می‌شدند اما از انواع بسیار پیشرفته و همراه با اصلاحاتی برای پاسخگویی به تولیدهای گوناگون. وانگهی ردیف کاملی از وسایل جدید، برای تسهیل عملیات صنعتی گوناگون ساخته شدند: تلمبه‌ها، تلمبه‌های اسید، مکشها، بادزنها. این وسایل هرقدر که کمتر با دست عمل می‌کردند، بیشتر کارایی داشتند؛ چنانچه در واحدهای بزرگ صنعتی، بوسیلهٔ ماشینهای بخار فعال می‌شدند.

این، صندوق مشترکی بود که ابتذال آن آغاز شده بود، اما تحول آن هنوز تنها به هوشمندی عملگران در دشواریهای سنتی: تخریب خشک، اسیدی کردن، خنثی‌سازی، تقطیر، تبخیر، تبلور، شستشو، خرد کردن، تلمبه‌زنی و غیره، بستگی داشت. ابتذال دستگاهها، دقیقاً سراسر کارهای جاری را شامل می‌شد. این ابتذال که بوسیلهٔ پراتیک صنعتی، جدید تحمیل شده بود نابودی خصیصهٔ سنتی را در آن سبب شد ـ پراتیکی که در نخستین دهه‌های سدهٔ نوزدهم هنوز خودنمایی می‌کرد و صنعت شیمی را به‌سوی ساختار دیگر، که کلاسیسیم، همهٔ صنعت شیمی سدهٔ نوزدهم و حتی کمی از سدهٔ بیستم را با آن خواهد پیمود، به پیش می‌راند. تغییر شکلهای این صنعت، تا اواسط سدهٔ بیستم، در اثر شکستهای چشمگیر پایه‌های آن نبوده است. در پشت روشهای کلاسیک سدهٔ نوزدهم، اصول سنتی وررفتن با وسایل و تأثیر عوامل شیمیایی معتبر در سدهٔ هجدهم و سده‌های پیش از آن، پنهان شده بودند. زبان صنعتی و بازرگانی با کهنگی زیاد خود، به نوعی ایمان تبدیل

شده بود. هنوز در سالهای ۱۹۰۰ـ۱۹۱۰ از زیت‌الزاج *Huile de vitriol* سوبلیمهٔ خورنده و جوهر نمک *Esprit de sel* صحبت می‌شد و نیز اصطلاحات فراوان دیگری، که مستقیماً از پراتیکهای سده‌های چهاردهم و پانزدهم برگرفته شده و قابل فهم بودند و عملگران آن را در می‌یافتند.

جهشی براثر شکافت لایه‌ای: اما در جنب این پیروی از سنت که کمی هم در ذات خود نو شده بود، هرچند که در روشهای خود لجوجانه انتقال داده می‌شد، شاخه‌های دیگری از شیمی صنعتی، پیشرفت خود را خوشبختانه، آغاز کردند. از این گفته نباید گمراه شد، زیرا جانشین کردن تکنیکهای نوین، هنوز هم در میانهٔ سدهٔ نوزدهم، کمی جسورانه بودند. گرچه شمع‌سازی با استئارین بزودی راه خود را باز کرد، قند چغندر و تقطیر زغال‌سنگ چنین نبودند. وانگهی از پراتیکهای دیگری که کمی بعد، در عصر راه‌اندازی صنعت در اروپا و امریکای شمالی، با سرعت کم‌وبیش زیادی رواج می‌یابند هنوز سخن نگفته‌ایم. در واقع این نوعی شکافت لایه‌ای بود نه گسستگی، که این جهش را در صنعت شیمی پدید آورد. پراتیکهای جدید، پایه‌های کهنی داشتند و آنها را نه اینکه ویران، بلکه برعکس، محکمتر کردند. دیده شد که چگونه سود لوبلان به سود صنایع معدن بود. گرچه صنعت اسید سولفوریک معمولی در فرجه‌ای از سی تا چهل سال به بالاترین مرحلهٔ تکامل خود دست یافت، صنعت اسید غلیظ، اسید بی‌آب یا اولئوم، آن‌طور که تاکنون آن را تعریف کرده‌اند در زندان روشهای سنتی، تا آغاز سده بیستم گرفتار بود و صنعت ساخت اسید نیتریک و کلریدریک، از تجهیزات مربوط به صنایع بزرگ، تا ربع سوم سدهٔ نوزدهم بی‌بهره ماندند. برای تهیهٔ نمکهای معدنی، عاری ازکربناتهای قلیایی باید گفت تا آنجا از روش تولید سنتی جدا شدند که رشته ساخت وسایل جدید به تولیدکنندگان این نمکها وسایل لازم برای پاسخگویی به نیازهای گسترده آنها را ارائه داشت و حتی آنها را تشویق کرد.

کوره‌ها و روش گرم کردن آنها

در سراسر سدهٔ نوزدهم، کوره و دیگ دو وسیلهٔ اصلی برای همهٔ شاخه‌های صنعت شیمی بودند.

روش گرم کردن، برحسب مورد، با آهستگی تغییر یافته است. دلمشغولی پیوسته شیمیدانها این بود که تماس شعله با کف کوره، کف و جدار دیگ بهتر شود. آتشدان از پهلو جابه‌جا یا پایین آورده شده بود. گازهای سوختی، معمولاً همراه با مقدار زیادی هوای اضافی، گرما را منتقل می‌کردند. این گرما بوسیلهٔ طاقی منعکس می‌شد یا دودکشی آنها را انتقال می‌داد.

کورهٔ بازتابی در سدهٔ هجدهم، رواج چندانی نداشت اما تهیه کربنات دو سود بروش لوبلان،

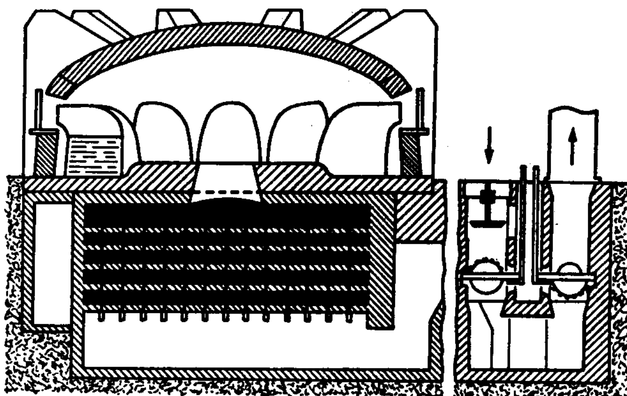
این کوره را برای مواقعی که یک فراورده باید بدون تحمل مرحلهٔ تکلیس، برای تشویهٔ مخلوطهای جامد بشدت گرم شود به‌طور وسیعی رواج داد. این شرط که در یکی از فازهای روش لوبلان وجود دارد، برای بسیاری از نمکهای دیگر هم که با تجزیهٔ مضاعف در حالت خشک به‌دست می‌آیند لازم است؛ ازجمله دی‌کرمات سدیم که صنعت ساخت رنگهای سنتزی از سال ۱۸۸۰ بدان نیاز داشته است. اصل بازتابانیدن بوسیله طاقی از مصالح ساختمانی، با شکلهای گوناگون در موقعیتهای زیادی به‌کار گرفته شده بود، ازجمله برای پخت ظروف سفالی.

شیشه‌پزی و سفالگری

انواع تازهٔ کوره‌ها: تنوع شکلها و مکانیسم طراحی شده برای کوره‌های شیشه‌پزی و سفالگری، راهی را نمایان می‌سازد که یک صنعت بسیار کهن، در سایهٔ تکنیک ساخت کوره‌ها، کاملاً نو شده است. انواع تازهٔ کوره‌ها معمولاً بسیار پیشرفته بودند، مانند کوره‌های شیشه‌پزی، که آقای زیمنس تکنیکی ابتکاری برای گرم کردن آن به‌کار برده بود (شکل ۱)، و در همان دوران در رشته‌های گوناگونی آن را آزمایش کرد. اما گاهی هم آنها ثمرهٔ طرحهای بسیار ساده‌ای بودند که کورهٔ حلقوی هوفمان (شکل ۲)، برای پخت آجر، نمونهٔ خوبی از آنهاست. با ترکیب ساده‌ای از دریچه‌ها و دهانه‌های متحرک، ورود و خروج هوا را در فضای یک حجره از یک راهروی حلقوی جابه‌جا می‌کنند تا هوای تازه، پیوسته روی انبوه آجرهای گرمی که به انتهای پخت رسیده‌اند وارد شود. هوا، بدین‌ترتیب پیش از رسیدن به بخش تونل، با تماس با آجرها، گرم می‌شود و در تونل با سوخت مخلوط می‌شود و پخت انبوه دیگری از خشتها را شروع می‌کند. آقای هوفمان با بهتر کردن چرخهٔ هوا با وسایل بسیار ساده، نوعی کورهٔ گردان اختراع کرد که ساکن ماند.

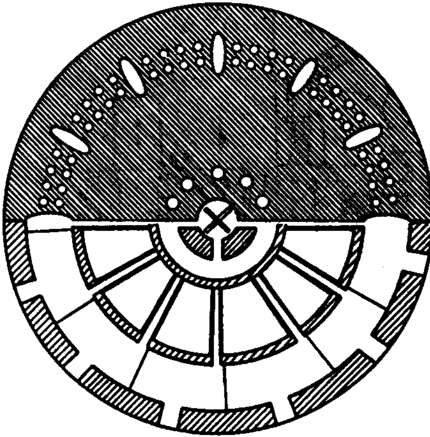
کوره‌های پخت شیشه، مکانیسم دیگری داشتند، که بستگی به این داشت که گرم کردن با زغال‌سنگ یا چوب انجام گیرد، یا اینکه می‌خواهند لیوان و استکان بسازند یا شیشه جام. خود مبانی ساخت این قطعات، از زمان آغاز صنعت شیشه‌سازی، تقریباً هیچ تغییری نکرده بودند. با دمیدن در نی کار را شروع می‌کردند، سپس کارهای سنتی و گوناگون شکلدهی انجام می‌گرفت. دربارهٔ خود کوره باید گفت که در مدتی بیش از بیست سال، در فرانسه، انواع کوره‌هایی که آقای دارتیگ[1] در آغاز این سده طرح کرده بود رواج داشتند. بوته‌ها یا در یک ردیف در کوره‌های مکعب مستطیلی، یا حلقه‌وار در کوره‌های مدور، روی سکویی از خاک، گذاشته می‌شدند و در میان آن دریچهٔ ورود آتش، برای سوخت زغال‌سنگی، یا یک چاله عمودی برای سوخت چوبی وجود داشت

1. Dartigue



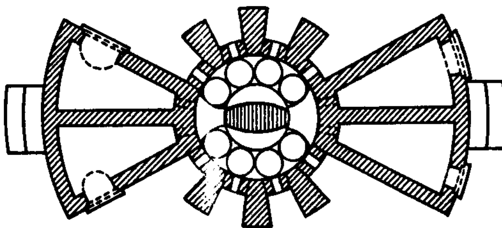
شکل ۱.کورهٔ شیشه‌پزی زیمنس.
قسمت بالا، شامل: کف کوره، سکویی که بوته‌ها را روی آن می‌گذارند، حلقه همراه یک دهانه در برابر هر بوته و گنبد کوره. در زیر کف کوره، تبادلگرهای گرما گذاشته شده‌اند که در اثر هوا یا گازهای سوختنی، می‌توانند از این یا از آن طرف گذاشته شده باشند. در سمت راست، ورود گازهای گازساز که از تبادلگری می‌گذرند که با گازهای سوختنی که به‌سوی دودکش (کاملاً در راست) جریان دارند، قبلاً گرم شده است. گازهایی که بدین‌ترتیب گرم شده‌اند در داخل کوره، با هوای گرم تبادلگر دوم برخورد دارند و می‌سوزند. در سمت راست، نمای مجرای ورودی و دودکش گازها از روبه‌رو دیده می‌شوند. در سمت چپ، مقطع کوره با نمای یک تبادلگر گرما دیده می‌شوند.

(شکل ۳). این کوره یک گنبد سوراخدار ـ و در صورت سوخت زغال‌سنگ ـ دودکشهایی با کشش به سوی طاقها داشت تا گرما بازیابی شود. دهانه‌ها روبه‌روی هر بوته بودند. سوخت زغال‌سنگ روی پنجرهٔ هر آتشدان، که در سطح پایینتری ازکف بود، در اثر دستکاری دیواره‌های آتشدان، گازی شدن جزئی زغال‌سنگ ممکن می‌شد، وگاز در بالای آتشدان می‌سوخت (شکل ۴). این دستکاری دیواره‌ها الهامبخش گازسازهای زیمنس بود، و از تحمل هزینهٔ نسبتاً گزاف برای ساختن وسایل، وی را معاف کرد. اما این کار امکان استفاده از مزیت اساسی روشهای گرم‌سازی زیمنس را از بین می‌برد. طی سالهای ۱۸۶۰ این روشها برای کوره‌های پخت شیشه به‌کارگرفته می‌شدند. خود برادران زیمنس نمونه‌های گوناگونی از این کوره‌ها، برپایهٔ اصل اختراعی خود، گازساز و دستگاههای بازیابی گرما طرح کردند که بعداً آنها را مورد بحث قرار خواهیم داد (رجوع کنید به صفحه ۶۲۲).

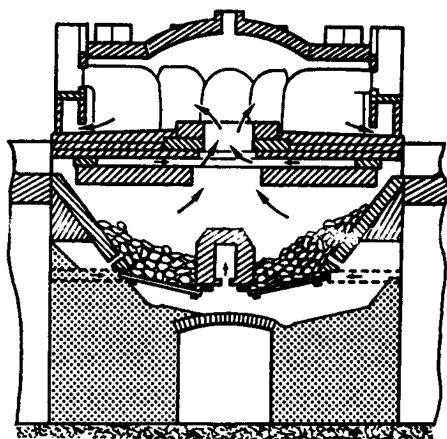


شکل ۲.کورهٔ حلقه‌ای آجرپزی هوفمان.
در اطراف کوره، دریچه‌هایی برای بارزنی و تخلیهٔ آجرها وجود دارند و در ضمن ورود و خروج هوا را ممکن می‌سازند. در وسط دودکش کوره دیده می‌شود.

شیشه‌های قالبی و شیشه‌های آبداده: این تغییر بنیادی گرم کردن کوره‌ها، که به شکل ابتدایی انجام گرفته بود و در حدود سال ۱۹۰۰ کامل شد، هیچ تأثیری بر روش ساخت قطعات نداشت. در ساخت لیوان و ظروف شیشه‌ای، تنها دو نوآوری مؤثر بودند: قالبگیری و آبدادن. کار قالبگیری به دمیدن در شیشه پایان داد و با این کار نقش و نگارهای برجسته‌ای روی قطعهٔ شیشه‌ای ایجاد



شکل ۳.کوره حلقوی دارتیگ برای پخت شیشه.
در وسط، پنجرهٔ آتشدان دیده می‌شود. هشت بوتهٔ حلقه‌وار ردیف شده‌اند؛ در برابر هرکدام، سوراخی برای بارگیری وجود دارد. در دو طرف کوره، قوسهای دود دیده می‌شود.



شکل ۴.کورهٔ حلقوی بئوتیوس برای پخت شیشه. در پایین، یک گازساز با ورودیهای جانبی هوا.

می‌شد. بعداً این کار روشی برای ساخت ظروف توگود، با دمیدن در دهانه، یا اشیاء توپر، مثلاً دستهٔ چاقو شد. در هر بخش قالب، به‌علت بار اضافی، هواکشهایی گذاشته می‌شد. در آغاز سدهٔ بیستم، ساخت ماشینهای قالبگیری مجهز به دَم مکانیکی شروع شد.

کار آب دادن شیشه، بار اول بوسیلهٔ آقای لاباستی[1] درکریستال‌سازی شوازی در سال ۱۸۷۵ انجام گرفت. این مبتکر در اثر خواص اشکهای باتاوی[2] که مدتهای زیاد حس کنجکاوی تماشاگران را تحریک می‌کرد، بدین کار راهنمایی شد. وی وسیلهٔ تنظیم همهٔ شرایط دقیق آبدادن قطعات شیشهٔ گرم در حمامهای روغنی را یافت. اما او در محاسبات خود اشتباه کرده بود و در اواخر سده، کارهایش بسیار معدود بودند. وی این کار را بعدها، بویژه برای آینه‌های بزرگ انجام می‌داد.

روش تولید آینه‌های ریخته‌گری شده، طی سدهٔ نوزدهم عملاً تغییری نیافت. تنها چند اصلاح کوچک در ساخت جنس آن به‌عمل آمد و بقیه کارها، همان‌طور مشابه آنچه که در نیمهٔ دوم سده پیش انجام می‌گرفت، ادامه یافت.

پیشرفتهای بسیار چشمگیر در شیشه‌گری، از جنبهٔ شیمیایی آن بوده است. فرمولهای مخلوطها و بویژه طبیعت دقیق ترکیبات چنان بخوبی استقرار یافته بودند که شیشه‌گران می‌توانستند مواد خامی

1. La Bastie

۲. منظور قطره‌ای از شیشهٔ ذوب کرده است که نوک خیلی تیز دارد و با چکانهٔ شیشهٔ مذاب در آب سرد تولید می‌شود. باتاوی: نامی است که فرانسویان پس از تصرف هلند در ۱۷۹۵ به آن سرزمین دادند. ـ م.

با ترکیب و خواص ثابت به‌کار گیرند. آنها انواعی از شیشه‌های بسیار گوناگون یا اجسام زجاجی وارد تجارت کردند که بعضی از آنها بدلهای موفقی از جواهرات بودند، از آن جمله می‌توان از strass ساخت آقای ی. اشتراسر[1] ساکن وین نام برد.

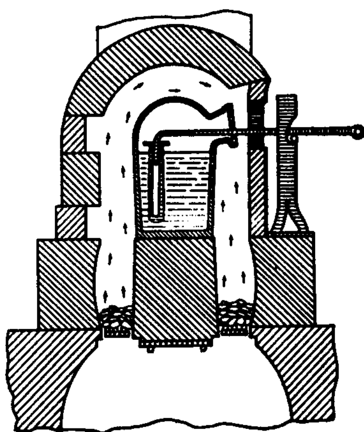
شیشه‌های اپتیک: شیشه به یاری اطلاعات جدید شیمی به ماده‌ای پاسخگوی نیازهای گوناگون تبدیل شد. در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم، شیشه بوهم، که اصولاً از کوارتز، کربنات پتاسیم و آهک زنده ساخته شده بود در آزمایشگاه‌های شیمی رواج کلی یافت. اما، ساخت شیشه‌های اپتیک بیشترین ترقی را داشته است. ترکیب شیشه کراون و نیز فلینت که برای ساختن عدسیهای بیرنگ لازم بودند شانه به شانه هم پیش می‌رفتند و گرچه چند نوع از آن را تولیدکنندگان مختلف پذیرفتند، همگی آنها امکان می‌دادند که به فراورده‌هایی با خاصیت اپتیکی ثابت دست یابند. شیشه کراون برپایهٔ شن، پتاس، سود و گچ بود و شیشه فلینت از شن، سرنج ($Pb_۳O_۴$) و کربنات پتاسیم؛ و نسبت سرنج در آن بسیار بیشتر از کریستال بود.

ساخت شیشه کراون بسیار آسان بود. اما شیشهٔ فلینت ساخت دشواری داشت و حدود یک سدهٔ بعد، آقای جان دالند انگلیسی در سال ۱۷۵۵ توانست تولید عدسیهای بیرنگ را به مرحلهٔ بازرگانی برساند. برتری انگلیسیها در اواخر سده هجدهم از بین رفت. شیشهٔ فلینت در آغاز سدهٔ نوزدهم در آلمان ساخته شد اما نتوانستند ثبات خواص آن را تأمین کنند. سرانجام آقای گینان سویسی، سازندهٔ ابزار دقیق، که چند سال نزد آقای فراونهوفر فیزیکدان و ابزارساز کار کرده بود، ریزه‌کاریهایی برای ساخت آن یافت که از آن جمله همزدن ذوب شده آن بود؛ و نیز آقای بونتان فرانسوی شیشه‌گر، که به نتایج کارهای گینان آشنا شده بود توانست تولید عدسی را به‌طور قطعی، صنعتی کند. اصولاً لازم است که گرم کردن، منظم و در کوره‌ای انجام شود که شعله‌های آن بوته را به‌طور کامل فرا گیرد (شکل ۵). نخست بوته را تا سرحد سفید شدن گرم می‌کنند سپس آن را در کوره می‌گذارند. بوته زمانی‌که در جای خود قرار گرفت مواد خام را به‌طور لقمهٔ یک کیلوگرمی در هر ساعت بدان می‌افزایند.

در پایان عملیات، پس از چهارده ساعت مجموع گرم کردن، هرساعت به ساعت، با یک همزن، که هنوز نام گینان بر خود دارد آن را به‌هم می‌زنند. این همزن، استوانهٔ طویلی از خاک نسوز است که آن را نیز قبلاً گرم کرده‌اند. عملیات با گرم کردن پایانی به مدت دو ساعت، تمام می‌شود، بوته را با زغال‌سنگ می‌پوشانند. زغال‌سنگ تقطیر می‌شود و گازها در زیر طاق کوره می‌سوزند.

روشن است که شکل کوره و هدایت گرما در این تولید اهمیت دارند. آقای بونتان از این روش

1. J.Strasser



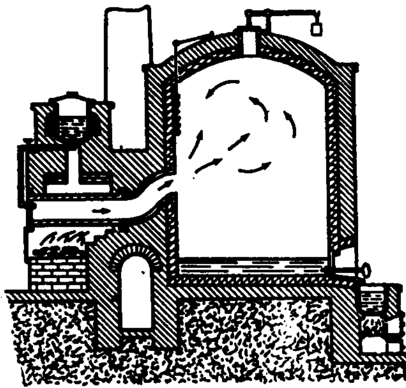
شکل ۵.کورهٔ ساخت شیشهٔ فلینت در بوته.
همزنی که جرم مذاب را در بوته منظماً به‌هم می‌زند، نام گینان را حفظ کرده است.

برای تهیه شیشهٔ کراون در کارخانهٔ خود در شوازی استفاده کرده است. تولید منظم شیشهٔ کراون و فلینت اپتیکی در تعداد زیادی از رشته‌ها: دستگاههای علمی، دریانوردی، مکانیک ابزار دقیق، مؤثر بوده است.

گوگرد و پیریتها

صنایع سرامیک و شیشه‌گری بی‌شبهه از صنایعی هستند که علاوه‌بر عمل آوردن کانیها در استخراج فلزات، انگیزهٔ تجربیات بسیار پیشرس در رشتهٔ گرم کردن صنعتی بوده‌اند. از همان آغاز تولید سود لوبلان، و تأثیری که در پیدایش صنعت بزرگ معدن داشت، این پیشهٔ آتشکاری می‌بایست با همهٔ تولیدهایی که در سدهٔ نوزدهم عناصر بسیار گوناگون صنایع سود را تشکیل می‌دادند، سازگار شود. در این رشته‌های تولیدی، نخستین مرحلهٔ، تهیهٔ گوگرد بود، نخست برای اینکه در اطاق سربی سوزانیده شود، سپس در کوره‌های ویژه‌ای برای تهیهٔ مخلوط گاز سولفورو و بخارهای نیترو، تا به اطاق سربی، که پیوسته در کار است فرستاده شوند.

استخراج گوگرد: در اوایل این سده، گوگرد در همان محل معدن تهیه می‌شد، و برای این کار از روش ابتدایی توده کردن آن در یک شیب استفاده می‌شد. این کوره سرباز را مشتعل می‌کردند، سوخت آن همان خود گوگرد بود و با گرمای برخاسته از سوختن آن، بخشهای دیگر گوگرد ذوب می‌شدند.

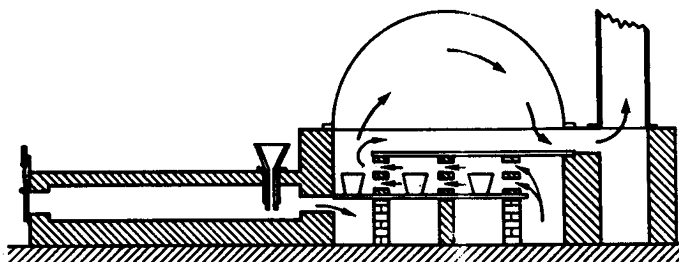


شکل ۶.کورهٔ میشل برای خالص کردن گوگرد.
گوگرد در یک دیگ بالا، در قسمت چپ شکل ذوب شده است. گوگرد مذاب در قرع، که در زیر دیگ قرار دارد وارد می‌شود و در آنجا تقطیر می‌گردد.
در قسمت راست شکل، اطاق بزرگ میعان و ساخته شدن گل گوگرد است.

بدین‌ترتیب، از همان آغاز، طرح کوره‌های حقیقی، که خمره‌های سرامیکی یا استوانه‌های فلزی را در آنها می‌چیدند ارائه شده بود. استخراج گوگرد با جریان یافتن آن یا تقطیر انجام می‌گرفت. این روش در نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم، با گرم کردن گوگردها با بخار آب، به‌جای سوزانیدن بخشی از گوگرد، بهتر شد.

برای خالص کردن گوگرد، از تقطیر استفاده شد. در سال ۱۸۱۵ برای این کار، کوره‌ای طرح شد که در بخشی از آن نخست ذوب و سپس تقطیر عملی می‌شد؛ بعد در بخش دیگر آن کوره، تبدیل گوگرد تصعیدی به گل گوگرد یا به گوگرد مایع که به شکل قلم یا باتون ریخته‌گری می‌شد انجام می‌گرفت (شکل ۶). در این کوره که ابتکار یک صنعتگر اهل مارسی به نام میشل بود گویا صرفه‌جویی به شکل جدید برای نخستین بار در آن رعایت شده بود. کوره‌های تولید مصالح ساختمانی، پیش از آنکه در آنها گازساز و تبادلگرهای گرما به‌کار برده شوند با همین دید ساخته می‌شدند.

برای بیرون کشیدن گوگرد از پیریتها بروش تکلیس، کوره‌های نوع دیگری هم طرحریزی شدند. عملیات در قرعهایی که بالای آتشدان کوره دارای طاق نیمگرد گذاشته می‌شدند انجام می‌گرفت. تجربهٔ کوره‌های پخت آهک، که سابقه‌ای بس طولانی دارند، برای ساخت کوره‌های پخت پیریت مورد استفاده قرار گرفت. تکلیس پیریتها تنها در مناطق دور افتادهٔ دارای رگه‌های گوگرد طبیعی



شکل ۷.کورهٔ تهیهٔ گاز سولفورو؛ هریسون ـ بل ایر
بارزنی کوره از راه قیف بالایی در ظرف سمت چپ انجام می‌گیرد و گوگرد در آنجا می‌سوزد. عمل احتراق در آتشدان سمت راست پایان می‌گیرد؛ بخارها از روی دیگهای محتوی نیترات می‌گذرند.

به‌کار گرفته می‌شد.

در ربع دوم سدهٔ نوزدهم، کاربرد کوره‌ها برای سوخت گوگرد مخلوط با نیترات، جهت تغذیهٔ پیوستهٔ اطاق سربی آغاز شد (شکل ۷). نخستین نمونه‌های این کوره‌ها دارای کفی بودند که یک ظرف چدنی پر از مخلوط فوق را در آن سَر می‌دادند تا محتوی آن بسوزد.

در این روش، ردیفی از کوره‌ها لازم بود تا تغذیهٔ پیوستهٔ اطاق تأمین شود. طی ۲۵ یا ۳۰ سال، کوره‌هایی با سوخت گوگرد طرح شدند که می‌توانستند پیوسته کار کنند و در آنها گوگرد تصعید شده پیش از آنکه گازها به اطاق برسند، نشت می‌کرد، یا اینکه برای تکمیل سوخت به‌کار برده می‌شد.

تشویهٔ پیریتها: برای تهیهٔ مستقیم گاز سولفورو از پیریتها بروش تشویهٔ آنها، کارگاههای متعددی در فرانسه و آلمان در آغاز سده نوزدهم تلاش کردند. اما اشتعال این مواد دشوار بود و نیز تولید گازهای محتوی ناخالصیهای مزاحم از معایب آن شمرده می‌شد. با این‌حال، تشویهٔ پیریتهای مس، مرحله‌ای از استخراج مس از کانیهای گوگردی آن می‌باشد. همچنین زمانی‌که تولید اسید سولفوریک درحال تبدیل به یک صنعت مهم بود، صنعتگران متعددی مسأله استفاده از گازهای سولفوروی تشویه را بررسی می‌کردند. در فرانسه، امتیاز آقای میشل پره که در سال ۱۸۳۵ به ثبت رسید معاصر آغاز کاربرد همین روش در اتریش بود که آقای ی. برم[1] آن را مستقلاً اندیشیده بود.

این روش رواج نیافت؛ زیرا در همهٔ صنایع، ثبات روشها، به‌طورکلی تجهیزات، سنت شده بود مگر اینکه به تغییر آن ناچار باشند. اما به‌دنبال انحصاری که توسط مؤسسات ته[2] در مارسی در مورد صادرات گوگرد سیسیل در سال ۱۸۳۸ ایجاد شده بود، بهای این فراورده یکباره سه برابر شد

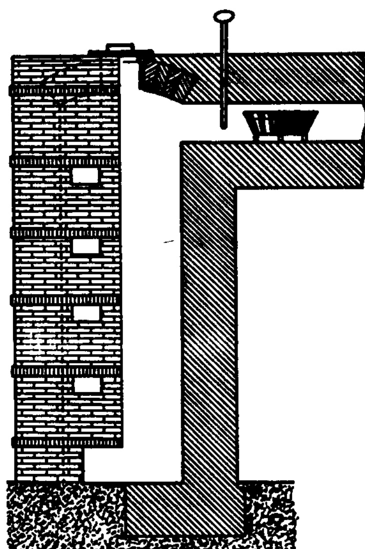
1. J.Brem 2. Taix

و نوآوریهای تشویه، به کار گرفته شدند. کاربرد گازهای سولفورو پیریت در ۱۸۳۹ در انگلستان و در ۱۸۴۰ در آلمان متداول شد. بعداً این کار بسرعت تعمیم یافت و بهای گوگرد، با اینکه انحصار مؤسسات ته از بین رفته بود، به‌علت کاربرد آن در مداوای موستانهای کشورهای مدیترانه‌ای که در اثر سفیدک مو خراب شده بودند، کاهش نیافت. اما خسارت آن‌چنان زیاد هم نبود و در نتیجه، هم مقدار مصرف گوگرد و هم بهای آن کاهش یافت. بدین‌ترتیب دوره کوتاهی از شک و تردید دربارهٔ آینده هر دو روش تهیهٔ گازهای گوگرد ایجاد شد. اما در پایان سالهای ۱۸۶۰ تشویهٔ پیریتهای مس و آهن به‌طور قطعی از بین رفت.

رگه‌های تازه‌ای استخراج و رگه‌های قدیمی از نو سودآور شدند؛ مثلاً معدن سن بل[1] نزدیک لیون، که می‌بایست زمانی‌که آقای پره کاربرد تازه‌ای برای پیریتها یافت، متروکه شده باشد. مؤسسه‌ای که در آن زمان به مدیریت فرزندان وی بود در سال ۱۸۷۱ در شرکت سن گوبن، شونی[2] و سیری[3] ادغام شد. در آن زمان گمان داشتند که این رگه می‌تواند حتی تا یک سده هم سودآور باشد. در این دوره، پشتینی که سلف شرکت مرل[4]، نخستین تولیدکنندهٔ آلومینیم با روش شیمیایی آقای هانری ست ـ کلر ـ دوویل بود، استفاده‌کنندهٔ اصلی رگه‌های موجود در مناطق گار و آردش بود که تولید آنها همراه با تولیدهای رون، $\frac{۹}{۱۰}$ مصرف فرانسه را تأمین می‌کردند. در اروپا، فرانسه در استفاده از پیریتهای مس و آهن مقام نخست را داشت. از سال ۱۸۶۴ تا ۱۸۷۴ مقدار تولید ملی آن از ۹۰۴۰۰ به بیش از ۲۱۰۰۰۰ تن رسید. آلمان، در مقام دوم، تولید آن از ۳۲۰۰۰ به ۱۲۸۰۰۰ تن رسید. انگلستان که بزرگترین مصرف‌کنندهٔ این ماده بود در همان سالها از ۱۷۰۰۰۰ در سال ۱۸۷۴ به ۵۵۴۰۰۰ تن دست یافت. واردات آن از پرتغال، سومین کشور تولیدکننده، اسپانیا، آلمان و نروژ بود. سوئد در منطقه فالون[5] رگه‌هایی از این کانی داشت که قابل‌توجه به‌شمار می‌آمدند.

کوره‌های جریانی: زمانی‌که روش تشویه برای تهیهٔ SO_2 به کار گرفته شد نمونه‌های متعددی از کوره‌ها بسرعت ساخته شدند. تشویهٔ پیریتها برای تهیهٔ گاز سولفورو جهت تولید اسید سولفوریک، کار بسیار ظریفی بود. نتیجهٔ کار بستگی به کمیت کانیهایی داشت که در کوره بار زده می‌شدند و نیز نحوهٔ سوختن گوگرد و جاری شدن مواد تشویه شده و بالاخره کشش هوایی که وارد کوره می‌شد. چنین می‌نماید که شکست نخستین آزمایشگرانی نظیر کلمان دزورم به‌علت اضافی بودن هوایی بود که بدرون کورهٔ خود می‌دمیدند. تنها پس از چند آزمایش کورکورانه بود که آقای میشل پره و همکار وی اولیویه اظهار داشتند که بازده اسید در اطاقها، اگر ورود هوا در کورهٔ سوخت پیریت، کمتر باشد بالا خواهد رفت، و درحین عملیات نیز باید مقدار ورود هوا با شرایط مرحله‌ای کار تطبیق

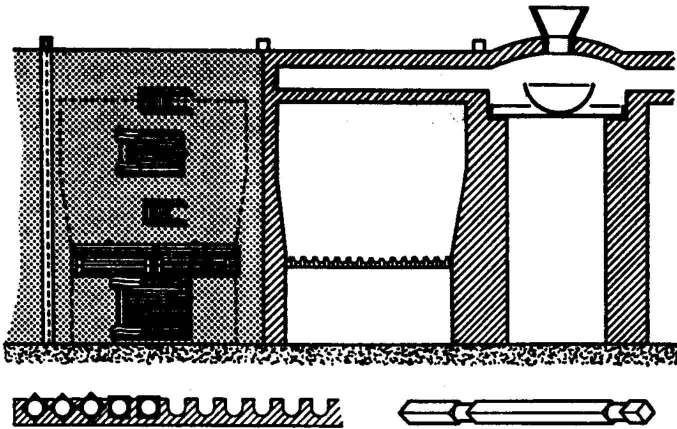
1. Saint-bel 2. Chauny 3. Cirey 4. Merles 5. Fahlun یا Falun



شکل ۸.کورهٔ جریانی برای تشویهٔ پیریتها.
کانیها از بالا در کوره ریخته می‌شوند. آتشدان در پایین آنها را می‌سوزاند. گازها درحین فرار از یک مجرای مستقیم از دیگ محتوی نیترات می‌گذرند. از سوراخهای دیوار هوا وارد کوره می‌شود و کانیهای کلوخه شده را سیخ می‌زنند

داده شود. عوامل متعدد دیگری نیز در نتیجهٔ تشویه مؤثر هستند. برای رفع مشکلات متعددی که با آنها روبه‌رو می‌شدند راه‌حلهایی پیاپی ارائه می‌شد.

آقای پره در اوایل کار، پیریتهای کلوخه‌ای را تشویه می‌کرد و کورهٔ وی به‌طور ساده براساس مدلی ازکوره‌های آهکپزی بدون پنجره، از نوع کوره‌های عمودی جریانی ساخته شده بود که شکل داخلی آن شباهت زیادی به کوره‌های بلند داشت. در انگلستان نمونهٔ نخست، کوره‌ای با دو آتشدان روی یکدیگر بود که در آتشدان پایین، خاکستر و نخاله‌هایی که از پنجرهٔ آتشدان بالایی پایین می‌ریختند سوختنشان ادامه می‌یافت. هر دو شکل کوره رضایتبخش نبودند برای ساختن نمونه‌های فراوان دیگری ازکوره‌های جریانی، یعنی کوره‌های عمودی با دیوارهٔ قائم یا مایل کوشش شد که مقطع آنها از بالا به پایین تنگ می‌شد یا نمی‌شد و دارای سوراخهای با فاصلهٔ معینی در دیوار بودند تا بتوان بارکوره را جابه‌جا کرد، (شکل ۸). پایین کوره که پنجره‌ای نداشت با یک لبهٔ عمودی، دو بخش



شکل ۹.کورهٔ پنجره‌ای برای تشویه پیریتها.
در سمت چپ، نمای کوره، از روبه‌رو از پایین به بالا به ترتیب: دریچهٔ آتشدان، دریچه برای گردانیدن میله‌های پنجره، روزنهٔ دید، دهانهٔ بارزنی و روزنهٔ دید. در سمت راست، برش عرضی کوره عمود بر نما بخارها از روی قفس نیترات مستقیماً فرار می‌کنند. در پایین، جزئیات پنجره با میله‌های گردان، و یک میله بتنهایی نشان داده شده است.

شده بود. کانیها را از دهانهٔ بالا به شکل لقمه‌هایی وارد کوره می‌کردند و تودهٔ تشویه شده در پایین، جدا و از دو سوراخ جانبی خارج می‌شد. در فرانسه و انگلستان این نوع کوره در چندین نوع ساخته شدند. اما در همان حال هم کوره‌های پنجره‌دار، باقی ماندند.

کوره‌های پنجره‌دار: سرانجام کورهٔ پنجره‌دار برای درمان سنگهای معدنی که فراوردهٔ تشویه آنها به‌اندازهٔ گازهای سولفورو اهمیت داشتند برگزیده شدند. انگلیسیها ادعا دارند که بهترین نسبت و بهترین ساختمان را برای این کوره یافته‌اند (شکل ۹): سه دیوار متمایل از چهار دیوار، توأم شدن دو کوره که پشت به یکدیگر داده‌اند، طاق با رگه‌های طولی که مرکز آن روی دیوارهٔ مشترک تکیه دارد. دهانهٔ کوره روی دیوارهٔ جلویی بود و گازها در یک گردآور ته‌نشین‌کنندهٔ غبار جمع می‌شدند. این گازها پیش از خروج، از قفس نیترات می‌گذشتند و در آنجا سولفات تشکیل می‌شد و بخارهای ازت آزاد می‌شد تا با گازهای سولفورو مخلوط و به اطاقهای سربی فرستاده شوند.

وسایل متعددی در جریان سی سال پژوهش ساخته شد که رفته‌رفته در همهٔ کوره‌های درمان شیمیایی و حتی گرم‌سازی صنعتی به‌کار گرفته شدند. آتشدان با پنجرهٔ گردان که از مدتها پیش

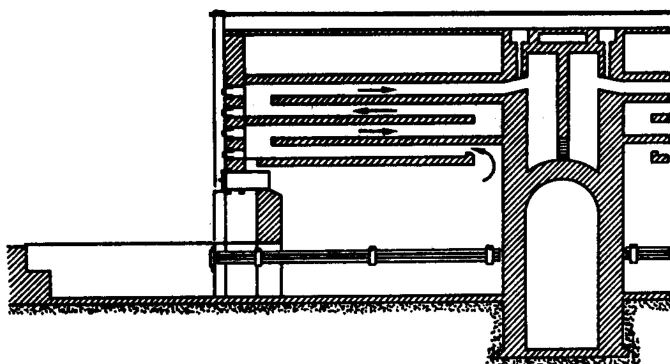


شکل ۱۰.کورهٔ اسپنسر برای تشویهٔ پیریت غباری.
در پایین، آتشدان بازتابی؛ در بالا، اطاق تشویه. این نوع کوره، ۱۲ متر طول و ۲ متر عرض دارد.

آقای پره طرحریزی کرده بود. میله‌ها از چدن با مقطع مربعی بودند و در دو سر آنها شکافهایی استوانه‌ای بود که در راده‌های دایره‌ای خرکهای طولی جفت می‌شدند. حرکت آنها بواسطهٔ دسته‌ای بود که یک کارگر متناوباً روی انتهای هر میله درگیر می‌کرد و آن را با دست می‌گرداند. این وسیله عملیات بسیار وقتگیر و دشوار آخالگیری را حذف می‌کرد. سرانجام، برای مؤسسات بزرگ گودال بسیار عمیقی می‌کندند تا بتوانند با واگنی که روی ریل حرکت می‌کرد خاکستر کوره را در آنجا تخلیه کنند.

کوره‌های کفی و تشویهٔ غباری: پیریتهای بعضی از رگه‌ها، شکننده‌تر از آن هستند که بتوانند به شکل گرد یا دانه‌های ریز تشویه شوند. کوره‌هایی مخصوص برای تشویهٔ آنها ساخته شدند (شکل ۱۰). نمونه‌های نخستین این کوره‌ها، از نوع موفلی (آستردار) افقی با طول ۱۵ تا ۳۰ متر بودند. آتشدان آنها با زغال‌سنگ می‌سوخت، اما از نظر ایجاد آلودگی محیط چنان وحشتناک بودند که کاربرد آنها ممنوع اعلام شد. صنعتگران نیز بدلیل دشواری اداره، از ساخت آن صرفنظر کردند.

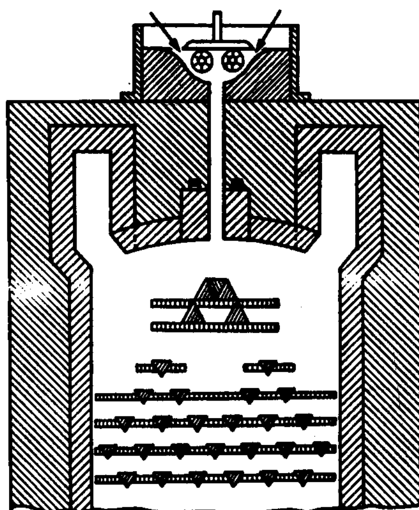
باز باید از آقایان پره و اولیویه نام برد که پس از چند آزمایش، کورهٔ چند طبقه را طرحریزی کردند. کفهای این طبقات پیچ و خمدار بودند به‌طوری‌که گازهای گرمی که از آتشدان متصاعد می‌شدند با لایه‌های نازکی از پیریت با ضخامت تنها چند سانتیمتر تماس می‌یافتند و آنها را مشتعل می‌ساختند. از راه سوراخهای جانبی، با سیخی، باقیماندهٔ غبار تشویه شده را در خاکستردانی می‌ریختند سپس غبارهای کفهای بالا را یک طبقه پایین می‌آوردند. بارزنی این کوره از مواد خام تنها روی بالاترین کف انجام می‌گرفت. آتشدان، پنجره‌ای از میله‌های گردان داشت و با کلوخه‌هایی از پیریت تغذیه می‌شد. این نوع کوره‌ها را بنابراین، مختلط می‌نامیدند. کورهٔ ساخت آقایان اولیویه و پره با یک مجرای بزرگ جانبی تکمیل شد که طاقچه‌ای برای نیترات داشت (شکل ۱۱). گردوغبارگیری گازها با گذرانیدن از یک دهلیز طویل که در زیر این مجرا بود و گازهای هر دو کورهٔ مشترک را دریافت می‌کرد، انجام می‌گرفت. این سیستم چند سال بعد بوسیله آقای یوهل مدیر کارخانهٔ مالترا تکمیل



شکل ۱۱.کورهٔ اولیویه ـ پره برای تشویهٔ پیریت.
دو کوره به اطاقهای غبارگیری ازگازها راه دارند. کلوخه‌های پیریت روی پنجرهٔ آتشدان در پایین، می‌سوزند. کلوخه‌ها از دهانهٔ بزرگ کوره، واقع در دیوار سمت چپ، بدرون آن ریخته می‌شوند. خاکهٔ پیریتها از بالا در کوره ریخته می‌شود و توسط سوراخهای مربوطه واقع در دیوار سمت چپ از بالا به پایین روی کف کوره رانده می‌شود. خاکستر آنها در خاکستردان، سمت چپ، ریخته می‌شود. گازها و هوا در جهت مخالف پیش می‌روند.

شد. این نوع کوره با نام مالترا بسرعت در تقریباً همهٔ کشورها، پس از به نمایش گذاردن آن در نمایشگاه سال ۱۸۷۳ وین پذیرفته شد؛ تا این تاریخ مکانیسم این کوره محرمانه بود، آرایش کلی و جزئیات آن را نمی‌شد به ثبت رسانید. کورهٔ مالترا به شکل ردیفی از چهار کورهٔ پهلوی هم ساخته می‌شد که یک اطاق غبارگیری مشترک داشتند. آتشدان پیوسته‌ای نداشت و آن را برای راه‌انداختن گرم می‌کردند و پیریتهای بارزده شده در گرما مشتعل می‌شدند، آن‌گاه پیوسته کار می‌کرد، جابه‌جا کردن مواد در داخل کوره با دست بود. تفاوتهای آن با کوره اولیویه ـ پره در چند مسألهٔ جزئی بود که بخصوص مربوط به مکانیسم بارزدن و کشش هوا می‌شد که تنها پس از آزمایش اساسی کار کوره‌ها عموماً و نیز نوعی آزمایشگری پراگماتیکی موشکافانه برطرف شدند.

عملگران دیگری در همین دوره کوره‌هایی طرح کردند که جابه‌جا شدن پیریت در آنها در اثر وزن به‌طور خودکار انجام می‌گرفت. آنها به‌طورکلی از اصل کوره‌های چند طبقه پیروی کردند؛ کفهای این طبقات متناوباً نسبت به یکدیگر شیب متقابل داشتند به‌طوری که بار درون کوره که از دهانهٔ بالا ریخته می‌شد ضمن سرخوردن به پایین با جریان هوای گرم و بالا روندهٔ آتشدان، در جهت مقابل، برخورد می‌کرد. همین آتشدان چندین کورهٔ متقابل را تغذیه می‌کرد. در مدل دیگری که مزایا

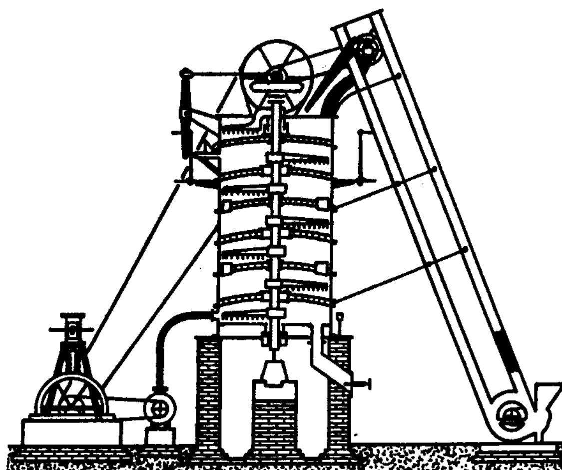


شکل ۱۲.سقف کوره گرستن هوفر برای تشویهٔ پیریتها.
کوره با کار پیوسته؛ در بالا، سیستم خودکار بارزنی، پیریتها، بر روی همهٔ دهانه کوره تقسیم شده‌اند.

و معایب آن گفت‌وگوی سختی را برانگیخت، کوره گرستن هوفر[1]، کفهای کوره با کاردانی جای خود را به نوعی بازی منشورهایی از گل نسوز داده بودند که با پیچ و خمهایی از بالا به پایین اطاق سوخت گذاشته می‌شدند (شکل ۱۲). نوعی از این کوره مجهز به سیستم بارزنی خودکار، از دو استوانه شیارداری تشکیل می‌شد که یک پیچ بی‌انتها که ماشین بخاری آن را فعال می‌ساخت، این دو استوانه را می‌گردانید. غبار پیریت که یک منشور واژگون زیر دهانهٔ بارزنی، آن را توزیع می‌کرد، روی منشورهای طبقاتی به شکل کاسه‌هایی رسوب می‌کردند و بتدریج در اثر فشار بارهای بعدی و نیز تشویه پایین می‌افتادند تا در خاکستردان جای گیرند. وسایل درونی اطاق تشویه، دستخوش تغییرات زیادی بودند.

با همهٔ این تحقیقات، بخوبی روشن است که دو نوع کوره‌ای که حدود سال ۱۸۸۰ بیش از سایرین رواج داشتند کوره‌های موفلی (آستردار)، از کوره‌های سنتی ارزان، و برای تأسیسات بزرگ، کورهٔ چند طبقهٔ مالترا بود.

1. Gerstenhoefer

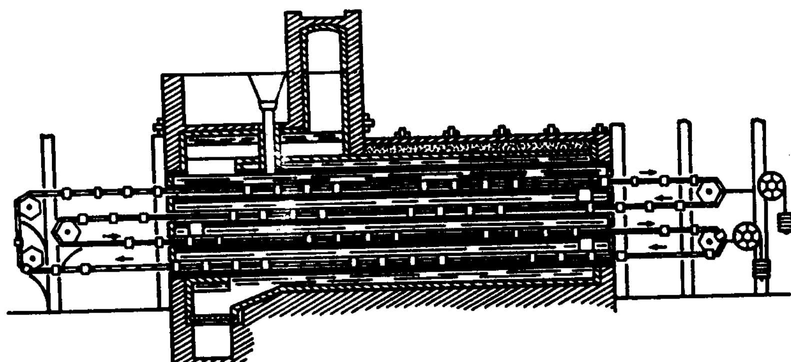


شکل ۱۳.کوره تشویهٔ پیریت با همزن گردان، ساختهٔ مک دوگال.
گنبدهای طبقات متناوباً یک معبر مرکزی و یک معبر جانبی دارند. در سمت چپ، ماشین بخاری محور گردش همزنها، دم و مکانیسم بارزنی (در سمت راست) را فعال می‌سازد.

کوره‌های مکانیکی: در این دوره، نخستین کورهٔ مکانیکی که ساختمان آن سراسر فلزی بود به توسط آقای مک دوگال[1] طرح شد. این کوره با بی‌اعتنایی مواجه و تقریباً کنار گذاشته شد (شکل ۱۳). این کوره، یک استوانهٔ بزرگ ساخته شده از حلقه‌های چدنی روی هم چیده و پیچ و مهره شده، بود. هریک از برجستگیهای داخلی، حامل کفی گنبدی شکل بود که روی آن یک تیغهٔ دندانه‌دار می‌گردید. همهٔ این تیغه‌ها روی یک محور عمودی نصب شده بودند و دندانه‌های آنها در جهات مقابل یکدیگر شیب داشتند تا پیریت در جریان تشویه به‌طور متناوب به طرف مرکز یا محیط کف کوره فرستاده شود تا به طبقه پایین راه یابد. این کوره را که در پایین، آتشدان پیوسته‌ای نداشت از پیش گرم می‌کردند تا پیریتهای تشویه‌شونده مشتعل شوند. همهٔ عملیات به‌طور مکانیکی انجام می‌گرفت و مصرف زغال ماشین بخار که بادبزن، زنجیر بادزنی و محور عمودی را حرکت می‌داد با صرفه‌جویی در عدهٔ کارگران، جبران می‌شد. خوب کار کردن کوره در گرو مهارت کارگران نبود.

این کوره‌های مکانیکی که در آن زمان در صنعت شیمی به‌کار گرفته می‌شدند، به‌طورکلی استوانه‌هایی کمی مایل از حالت افقی بودند و حول محور خود می‌گردیدند. آنها همچون صنایع

1. Mac Dougall



شکل ۱۴.کورهٔ موفلی تشویهٔ بِلند.
چهار موفل بر روی هم، بوسیلهٔ یک زنجیر بی‌پایان تیغه‌دار، متناوباً در جهات متقابل طی می‌شوند. در قسمت بالا، قیف بارگیری و دودکش دیده می‌شوند. در پایین، آتشدان و خاکستردان و در سمت راست، مکانیسم کشنده زنجیر است.

دیگری، که از گذشته سنتی طویلی بر خودار بودند بدون هیچ‌گونه مخالفتی پذیرفته شدند. چنین می‌نماید که معاصران مزایای کوره پیریت مک دونالد را کم ارج نهادند و از آن خوششان نیامد. این حقیقتی است که با وجود کارهای شارل کومب، دمهای صنعتی در پاسخگویی به همه نیازها بسیار ناتوان بودند. روش غبارگیری که شامل هدایت گازها در اطاقهای بزرگ بود برای کوره‌ای از این نوع و نیز کوره‌های دیگر کارآمد نبود و در ضمن، گاز پرغباری تولید می‌کرد.

کوره‌های مکانیکی با وجود نوعی محکومیت پیش از وقت، از دههٔ پایانی سدهٔ نوزدهم، تکثیر یافتند. اصل کوره مک دوگال درکارخانه‌ای واقع در وییی‌مونتانی[1] برای ذوب بِلند (کانهٔ روی) به‌کار گرفته شد. در ۱۸۹۴ آقای فراش در ممالک متحد امریکا چنین کوره‌ای برپا داشت. حدود سال ۱۹۰۰ شرکت رنانیا[2] درکارخانه‌های خود در هارتس[3] برای تشویهٔ بِلند، دستور ساخت کوره‌هایی با چهار موفل روی یکدیگر داد که یک زنجیر طولانی بی‌انتها که حامل تیغه‌هایی بود سراسر طول هریک از آنها را می‌پیمود (شکل ۱۴).

اطاق غبارگیری: حدود ده سال بعد، کوره‌های خودکار، تقریباً در همه‌جا بدلیل پیشرفتهایی که در ساختمان آنها ایجاد شده بود و باز بدین علت که ساختمان اطاقهای غبارگیر کوچک آن مجهز به وسایلی شده بود جانشین کوره‌های دیگر شدند. این نمونه یکبار دیگر نشان می‌دهد که امر نوآوری،

1. Vieille Montagne 2. Rhenania 3. Hartz

کار منفرد و ساده‌ای نیست. در این قضیه وسایل ساختمان مکانیکی، پیشرفته‌تر شده بودند و نیز تفکر طولانی روی طرح مجموعه‌های تشویه و غبارگیری، راه‌حلهای تازه‌ای را القا کرده بود.

این گرایش که مدت نیم سده ادامه داشت درپی یافتن ترتیبات دیگری بود که دخل و تصرف در کیفیات گوناگون مواد خام را برحسب خواص مکانیکی ویژهٔ آنها (شکنندکی)، درصد گوگرد و فلز و بالاخره محصول مورد نظر، ممکن سازد. چنین تحولی زمانی درک می‌شود که آن را در متن رشد صنایع شیمیایی، به‌طورکلی، قرار دهند، و اگر نتیجهٔ چنین متنی است، عاملی از آن نیز هست و هر دو جنبه بستگی بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند.

رواج کوره‌های مکانیکی

در همین اوان، کوره‌هایی که در سایر شاخه‌های صنایع شیمیایی، کاربردهای دیگری داشتند نیز چنین تحولی را تحمل کردند. در انگلستان کوره‌های با کف (مدور) گردان، و تیغه‌های ثابت حدود سالهای ۱۸۸۰ برای تولید سولفات سدیم، به تقلید از کوره‌ای که مدت چند سال در یک کارخانهٔ متالورژی همین کشور که از بعضی کانیهای گوگرددار بروش تشویهٔ کلروری، مس به‌دست می‌آورد، به‌کار گرفته شدند. کار کردن این کوره خوشبختانه ساده بود؛ انتقال حرکت بوسیلهٔ محور و دندهٔ واسطه‌ای انجام می‌گرفت که با یک چرخ دندانه‌داری که بر محور مرکزی کوره ثابت شده بود درگیر می‌شد. این مکانیسم، جانشین سیستم پیچیده زنجیر بی‌انتها شده بود. کوره‌های دارای تیغه‌های گردنده، در اواخر سدهٔ نوزدهم برای تکلیس بی‌کربنات سدیم، در پایان تولید سود به طریق آمونیاکی به‌کار گرفته شدند.

کورهٔ گردان، کورهٔ گردان مایل در همان زمان در امریکا برای ساخت سیمان پورتلند به‌کار برده می‌شد. این نوع سیمان را نخستین بار آقای جوزف اسپدین[1] در ۱۸۲۴ ساخت اما تولید صنعتی آن در سال ۱۸۵۰ آغاز شد. لازم بود که رسهای آهکی یا مخلوط رس و آهک را تا شروع شیشه‌ای شدن، تکلیس کرد. نمونه‌های متعددی از کوره‌هایی که تقلیدی از کوره‌های معروف برای این نوع تکلیس بودند به‌کار گرفته شدند. رایجترین آنها، کوره‌های استوانه‌ای با مصرف سوخت کم و دارای بارگیر، به شکلهای گوناگون بودند. این کوره‌ها گویا حلقه‌ای یا چند طبقه بودند. همهٔ کارهایی که بادست انجام می‌گرفت در آنها مکانیکی بود. پس از سی سال پیشرفت آهسته، تقاضا برای این کوره‌ها بسرعت افزایش یافت؛ در نتیجه کوره‌های گردان رو به راه شدند. پس از امریکا، که تنها یک کارخانه استیگ ولی[2] از شرکت اتلس سمنت آن، با ۲۹ کوره از این نوع در سال ۱۸۹۹ فعالیت

1. J.Aspdin 2. Stigh Valley

داشت، این نوع کورهٔ مکانیکی، حدود سال ۱۹۰۲ به انگلستان و از آنجا به اروپا وارد شد.

نمونهٔ دیگری از کوره‌های گردان برای تولید سولفات سدیم با اثر دادن اسید سولفوریک روی کلرورسدیم به‌کار گرفته شد. این زمانی بود که شیشه‌گری و بویژه آینه‌سازی شروع به استفاده از این سولفات به‌جای کربنات کرده بود. این کوره، یک استوانهٔ افقی بود که روی چرخکهایی می‌گردید و یک محور طولی در داخل آن در جهت مخالف آن گردش داشت. پره‌هایی بدین محور متصل بودند تا بار را از یک سر کوره به سر دیگر آن برانند.

کوره‌های فلزی: فلز، که آهن یا چدن بود، به‌طور روزافزونی جای مصالح ساختمانی را می‌گرفت. مدتها بود که فلز در ساخت کوره‌های شناخته شده برای چفت‌وبست آتشدانها، روزنه‌ها، دریچه‌های آدم‌رو به‌کار گرفته می‌شد، و حتی زمانی‌که فراورده‌ای که باید روی آن کار شود ممکن بود آجرها و گل نسوز را بسرعت خراب کند، بدنهٔ کوره را از فلز می‌ساختند. اما نقش آن، تنها کمک به مصالح ساختمانی بود که کارگران مؤسسه، آنها را در محل تهیه می‌کردند و در نتیجه از هزینه کاسته می‌شد. کاربرد فلز مزایای دیگری هم داشت و آن رها نکردن نوع ساختمانهای کلاسیک، کوره‌های بازتابی و استوانه‌ای عمودی بود که به مدت تقریباً نیم سدهٔ دیگر به‌کار گرفته شدند. فلز، ساخت سریع مجموعه‌های بزرگ را ممکن ساخت؛ به دوام آنها افزود؛ نگاهداری آنها را ساده کرد؛ و تغییر بخشی از آن را، بدون نیاز به تجدید ساختمان کل آن، میسر ساخت. وانگهی انواعی از راه‌حلها را در دسترس قرار داد. می‌توانستند کُل ساختار را تغییر دهند؛ بخشهای تکمیلی بدان بیفزایند تا میدان کاربرد این کوره‌های فلزی را برای تولیدهای تازه‌ای که در تعداد زیاد، در نیمه دوم سدهٔ نوزدهم از آزمایشگاه به کارخانه انتقال یافته بودند توسعه دهند یا اینکه کارایی یک وسیلهٔ سنتی را که دیگر از پاسخگویی به تقاضای روزافزون درمانده بود، بالا برند. وانگهی ساخت فلزی، شرط اساسی مکانیکی شدن کوره‌ها بود. نمی‌شد به کوره‌های گردانی اندیشید که بدون کاربرد فلز طرح یا ساخته شده باشند. نوآوریهای متعددی از این دوران، هنوز هم فعالیت دارند.

فراورده‌های آستری: سرانجام اهمیت انواع فراورده‌های آستری را برای حل مسائل برخاسته از ساختمان فلزی نباید نادیده گرفت. آجرهای نسوز معمولی طبعاً برای آستر کوره به‌کار گرفته می‌شدند. اما مصالح تازه‌ای با استفاده از کربنات منیزیم، پس از کارهای شلوزینگ در ۱۸۸۰، و کربنات دوگانهٔ منیزیم و کلسیم، دولومیت، از نام کاشف بدفرجام آن، دولومیو[1] زمین‌شناس ساخته شدند.

۱. Dolomieu دئودادوگراته دو ۱۷۵۰ ـ ۱۸۰۱ زمین‌شناس فرانسوی که در زندان با دودهٔ چراغ چند کتاب نوشته است.

آقای وازوم[1] در همان اوان نشان داد که برای آماده‌سازی یک مادهٔ چسبنده نسوز چکار باید کرد. اما متالورژی با ساختن کوره‌های زیمنس ـ مارتن و عمل آسترکاری کوره‌های بلند، که اسکلت آن فلزی شده بود، بی‌شبهه برای شناسایی آسترکاری از همه بیشتر کوشیده است. صنایع شیمی بزودی از آن بهره‌ای تام گرفت. منیزی (اکسید با هیدروکسید منیزیم ـ م) که در ترکیب بعضی سیمانها وارد شده بود برای آسترکاری کوره‌های دارای عملیات شیمیایی با چنان سهولتی بازار یافت که طی تنها بیست سال یک ردیف کامل فراورده‌های با پایهٔ ترکیبات منیزیمی به تقاضاهای گوناگون پاسخگو شدند.

گرم کردن با گاز و با بخارآب

روشهای گرم کردن نیز طی نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم تغییر یافتند. کورهٔ بازتابی در یک سده پیش، جانشین کوره‌های گرم‌سازی با شعلهٔ مستقیم، وگرم‌سازی با گذرانیدن گازهای گرم سوخت شد. علت اینکه کورهٔ بازتابی پیش از دههٔ دوم یا سوم سده بیستم کنار گذاشته نشد، این بود که برای بعضی عملیات هنوز چند مزیت اقتصادی و بویژهٔ از نظر متالورژی داشت. این کوره در تهیهٔ سود لوبلان با روش کلاسیک هم فعال بود. مؤسسات کوچک، زندگی خود را مدیون وفاداریشان به تکنیکهای کلاسیک می‌دانستند و از سرمایه‌گذاریهای بزرگ برای تغییر دادن تجهیزات خود پرهیز داشتند.

تبادلگرهای حرارت: اصل دودکشهای مبادله‌کنندهٔ حرارت، که متالورژی آن را در سالهای ۱۸۵۰ به میدان آورد، رفته‌رفته در صنایع شیمی متناسب با تکمیل شدن تجهیزات پذیرفته شد. پس ازکوپر، و سیستم وی که تبادلگر دو جریانی هوای سرد ورودی و گازهای گرم خروجی بود، آقای زیمنس تبادلگر متناسب خود را طرح کرد که سبب سرعت گرفتن پیشرفت این وسیله شد. دستگاه زیمنس از دو جفت تبادلگر تشکیل می‌شد: هوای سرد و گازهای سوختی که از گازساز می‌آمدند، مسیری جدا از یکدیگر داشتند. هوای سرد قبلاً در محل خروج گازها از کوره، توسط گازهای سوختی که جریانی مخالف آن داشتند، گرم می‌شد.

آنها در شیپورهٔ تبادلگر، نزدیک سقف گنبدی کوره با یکدیگر مخلوط می‌شدند و شعله بیرون می‌زد. در همین حال، فراورده‌های سوختی گرم با گذشتن از هر دو بخش تبادلگر حرارتی دوم، از کوره خارج می‌شدند. سپس جریان برعکس می‌شد و تبادلگر دوم گرمای بازیافتی را به گازهای ورودی انتقال می‌داد که این گازها نیز پس از سوختن، گاز اولی را گرم می‌کردند.

1. Wasum

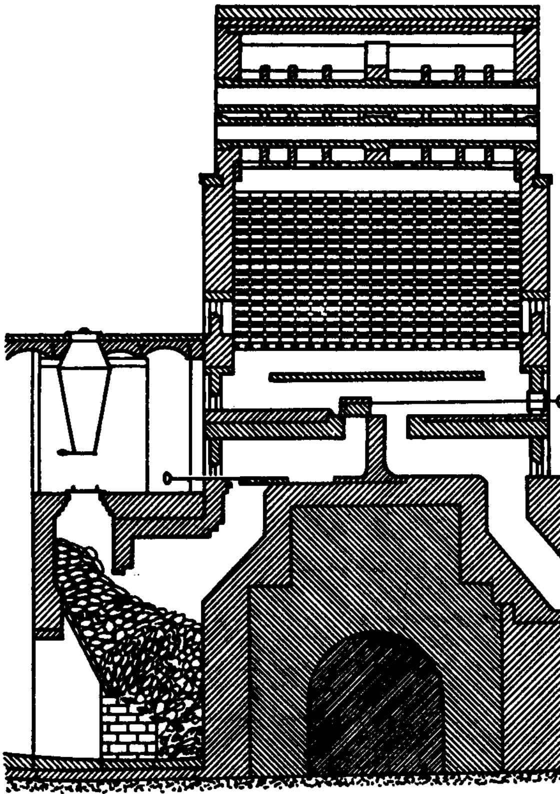
گازسازها: زیمنس نخستین آزمایش این دستگاه را در سال ۱۸۵۹ انجام داد، اما اختراع وی زمانی اهمیت خود را نشان داد که گازسازهایی که گازهای سوختی ـ نه روشنایی ـ تولید می‌کردند ساخته شدند. این نوآوری در کارخانه‌هایی از سیدرورژی (آهنکاری) شکل گرفت که کک در اختیار آنها بود و در آنجا گازهای کک‌سازی و نیز گازهای دهانهٔ کوره برای سوخت به‌کار گرفته می‌شدند، و این زمانی بود که هنوز از این گازها برای کار موتورهای گازی به‌طور سیستماتیک استفاده نمی‌شد ـ کاری که در سال ۱۸۹۰ آغاز شد تهیهٔ اقتصادی گازهای سوختی، با تجزیهٔ آب از طریق گذرانیدن آن روی کک سرخ شده یا با سوخت ناقص کک، بود. در روش نخست، گاز آب، بیشتر از هیدروژن و اکسید کربن ترکیب شده است، و در روش دوم، گاز سوختی محتوی اکسید مخلوط با نیتروژن و نیز درصد کمی، گاز کربنیک است.

نخست از گازهای سوختی استفاده شد. آقای ابلمن[1] مدیر کارگاه چینی‌سازی سور، نخستین کسی بود که اصل استفاده زغال‌سنگ، کک و دیگر سوختهای جامد کمتر غنی، لینییت و تورب را برای تولید، با اکسایش آرام، اکسید کربن مخلوط یا غیرمخلوط با فراورده‌های تقطیر و همچنین کاربرد آنها برای گرم کردن کوره‌ها، نشان داد. زیمنس نخستین گازساز را که با تبادلگرهای حرارتی وابسته بود ساخت و در آن زمان آن را ژنراتور نامیدند که تولید فولاد پیر ـ امیل مارتن با کمک آن در سال ۱۸۶۰ ممکن شد. صنعت پخت شیشه نخستین صنعتی بود که از این دستگاه، بهره گرفت، زیرا گرمای پیوسته با صرفه‌جویی ۶۰٪ با این وسیله میسر بود. پس از آن گاز روشنایی برای کوره‌های قرعی تقطیر خود، از آن سود برد (شکل ۱۵). صنایع دیگر شیمی از آن برای گرم کردن، نخست کوره‌های بازتابی و سولفات سدیم، استفاده کردند.

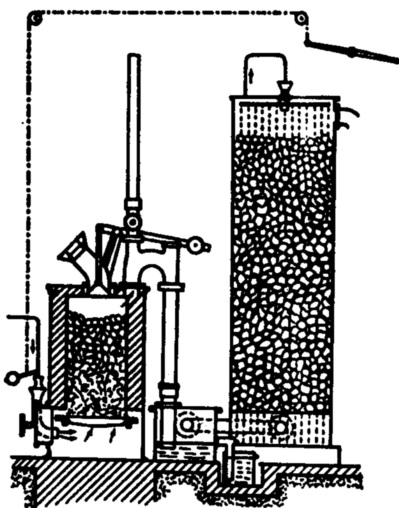
آقای زیمنس، در ترویج اختراع خود و به‌کارگرفتن آن در صنایع گوناگون، طبعاً پر حرارت بود. صنعتگران دیگری انواع گوناگونی از آن را پیشنهاد کردند. در ۱۸۸۷ ساخت صنعتی گاز آب آغاز شد. واکنش آب روی زغال چنان رهبری می‌شد که بویژه گاز کربنیک ـ نه اکسید کربن ـ با هیدروژن تشکیل شود. مقدار گاز کربنیک را از طریق همزدن محصول، در یک محلول قلیایی کاهش دادند. این گاز خالص شده به مدت چند سال در امریکا برای روشن‌سازی به‌کار گرفته می‌شد. چنین آزمایشی در فرانسه هم انجام گرفت، اما بی‌درنگ رها شد.

تولید گاز آب تنها زمانی گسترش یافت که تجهیزات یک گازساز رضایتبخش در سال ۱۸۸۷ در شهر اسن آلمان ساخته شد. گاز آب می‌بایست در پایان دههٔ نخست این سده، زمانی که کارخانه بادیش انیلین اوند زودا فابریک[2] دست به تهیهٔ آمونیاک سنتزی زد اهمیت بسیار یافته باشد.

1. Ebelmen 2. Badische Aniline und Soda Fabrik



شکل ۱۵.گازساز با تبادلگر حرارتی، ساخت زیمنس.
پایین، سمت چپ، گازساز با قیف بارگیری آن. در وسط، تبادلگر حرارتی که در واقع، در اثر گازهای سوخته‌ای که آن را گرم می‌کند و از سوراخ سمت راست پایین به بیرون می‌روند، از بالا تا پایین ادامه دارد. جابه‌جایی صفحاتی تنظیم گرما از مرکز، امکان می‌دهد تا گازهای تازه، وارد تبادلگر شوند؛ این گازها قرار است حول ظروف تقطیر که در بالا گذاشته شده‌اند، بسوزند.



شکل ۱۶.گازساز مختلط داوسن.
سمت چپ، ورود بخار آبی که از دیگ بخار می‌آید که مقدار آن را شناور کنتور گاز تنظیم می‌کند (رسم نشده است). بخار آب از گازساز می‌گذرد، در بالای گازساز قیف بارگیری گذاشته شده است که بستن و باز شدن آن خودکار است . مخلوط گاز آب با گاز فقیر به یک بشکه همزنی با آب تلمبه می‌شوند، آن‌گاه برج شست‌وشو را که با کک پر شده است از پایین به بالا طی می‌کنند، درحالی‌که آب از بالا به پایین جریان دارد.

اما تا آن زمان بیشتر از مخلوط گاز و هوا و گاز آب استفاده می‌شد و آن را، گاز مخلوط و بعدها گاز فقیر می‌نامیدند. معنی اصطلاح اخیر پیوسته در تغییر بوده است. گازسازهایی ساخته شدند که اساساً از کوره‌های عمودی مملو از سوخت فروزان تشکیل می‌شدند. زیر پنجرهٔ آتشدان آنها آب تزریق می‌شد. این آب تبخیر و با هوای دمیده وارد کوره می‌شد. انواعی از گازسازهای کوچکتر، که نصب آنها نیز ساده‌تر بود، طرحریزی شدند. رایجترین آنها گویا گازساز داوسن[1] (۱۸۸۷) بود. تردیدی نیست که آوازهٔ آن مرهون شهرت دویتس (سازندهٔ موتور گازی اوتو در شهرستان کولونی) بوده است. این وسیله، اساساً از یک دیگ بخار، گازساز، دستگاه گازشویی پر از کک و بالاخره یک کنتور گاز تشکیل شده است (شکل ۱۶). شناوری در کنتور گاز، بوسیله زنجیری که حرکت را انتقال می‌دهد، به ورود بخارآب که هوا آن را در خاکستردان گازساز پس می‌زند، فرمان می‌دهد. هم ساخت کوره‌ها، و هم دستگاههای سازندهٔ گاز سوختی، رفته‌رفته فلزی و مکانیزه شدند.

1. Dowson

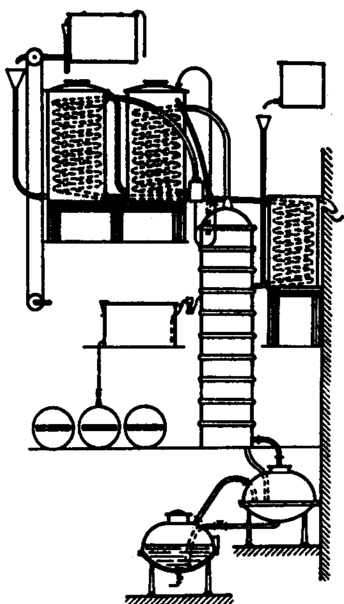
صنعت شیمی برای گرم کردن از وسایل دیگری استفاده می‌کرد که انعطاف‌پذیری لازم برای این صنعت را داشتند. در سال ۱۸۸۹ تزریق سوخت، گرد زغال، در کورهٔ گردان لویس برای تهیهٔ سیمان پورتلند عملی شد. این روش و پس از آن تزریق مازوت بعداً نه تنها در صنایع شیمیایی، که در صنایع دیگر، بویژه برای تغذیهٔ آتشدان دیگهای بخار مربوط به توربینها نیز به‌کار گرفته شدند.

بخارآب: در بسیاری از رشته‌های تولیدی، بخار آب یا هوای گرم، خیلی زودتر از نیمهٔ سدهٔ نوزدهم به‌کار گرفته شده بود ـ وسیله‌ای که برای تقطیر، تغلیظ و نمگیری از مواد بسیار مناسب بود؛ کارهایی که برای آنها دما می‌بایست ثابت و بسیار معتدلتر از روشهای شیمیایی خشک باشد. آقای ادوارد ادم نخستین کسی بود که در سالهای ۱۸۰۰ ـ ۱۸۱۰ از گرمای بخارآب در تقطیر استفاده کرد. این مخترع نخستین شکل انبیق مناسب تقطیر الکل محتوی در شراب را طرح کرده بود. موکاران در سپاسگزاری از او، مجسمهٔ وی را در مونپلیه برپا داشتند. در واقع این صنعت الکل و نیز قندسازی بودند که استفاده از گرم کردن با بخارآب را پایه گذاردند.

شماری از شیمیدانها یا دیگ‌سازان در دههٔ دوم سدهٔ نوزدهم این اصل را از نو به پیش کشیدند. در فرانسه، پس از ثبت امتیاز بلومنتال ـ سلیه[1] (در نوشتار آن زمان این دو نام به شکل سلیه ـ بلومنتال قید شده است) بود که آقای دروسن که حقوق آن را به‌دست آورده بود نخستین تجهیزات تقطیر صنعتی را در سالهای ۱۸۱۸ ـ ۱۸۱۹ برپا داشت. پس از مدتی تأخیر، تنها از یک قدردانی برخوردار شد، این وسیلهٔ تقطیر در پایان سده بخت بلندی یافت (شکل ۱۷). نمونه‌های دیگری که در این دوران و پس از آن ساخته شدند تقلیدی از این وسیله بودند.

دروسن و کل: شارل دروسن در آغاز سده، داروساز بود. وی به ساخت قند چغندر علاقه داشت و وسایل لازم برای استخراج آن را طرح کرده بود. او بدین جهت به مسگری روی آورد، سپس زمانی‌که با یک مکانیسین با قریحه به نام ژ ـ ف. کل شریک شد فعالیت خود را به ساخت وسایل مکانیکی ـ ماشینهای بخار، لوکوموتیوها، لوکوموبیلها، ماشینهای ابزار و غیره ـ گسترش داد. ساخت وسایلی برای صنایع شیمیایی که در ردیف کارهای مسگری بودند مدتهای زیادی از تخصصهای این شرکت بود که به دلایل گوناگون اجتماعی هنوز هم چنین است. تحول آقای دروسن و کل در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم بخوبی گواه این امر است که تجهیزات بعضی شاخه‌های صنایع شیمی در آن زمان چگونه بوده‌اند. سرانجام ساخت این نوع دستگاههای راه تغییر شکل بنیادین صنعت بزرگ شیمی را در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم گشود. کارگاه دروسن و کل طبعاً در این کار تنها نبود و بسیار کوچکتر از آن بود که جهت صنایع نوین را مشخص سازد. گرچه این کارگاه به‌علت محدود

1. Blumen Thal-Cellier



شکل ۱۷.تقطیر الکل با دستگاه بلومنتال ـ سلیه.
دستگاهی که بوسیلهٔ دروسن ـ دوبرونفو تکمیل شده است. در پایین، وسط، ظرف تبخیر که با بخارآبی که در جدار بیرونی گردش دارد، گرم می‌شود. در بالا، دیگ دوم با همزنی بخارهایی که از ظرف تبخیر آمده‌اند و برگشت بخارهای مایع شدهٔ ستون تقطیر، که ۱۸ بشقابک مشابه دارد. در بالا، سمت چپ، گرم‌کن شراب؛ سمت راست، خنک‌کنندهٔ مارپیچی برای مایع کردن الکلی که در ظرف مرکزی جریان دارد.

بودن نسبی نیازها در همه شاخه‌های صنایع شیمیایی، در ساخت بعضی از وسایل و تکنیکهای ساخت آنها، شهرتی بهم زد؛ در رواج آن تنها نبود. جای شگفتی نیست که چنین وسایل ویژه‌ای، کاربرد صنعتی خود را درکشوری بیابند که در آن زمان در ساخت شراب و الکل شراب در جهان پیشتاز، و نیز یکی از اولین تولیدکنندگان قند از چغندر باشد.

آبجوسازی: به‌طوری‌که معلوم است تقطیر الکل از زمان نوئه به بعد در انحصار هیچ کشوری نبوده است و منابع الکل خوراکی، علاوه‌بر عصارهٔ انگور، فراوان بودند. از اینکه در گذشته، الکل را از یک مادهٔ گیاهی می‌گرفتند، جای تردید است. اما برای ساخت خوراکی این‌چنین متنوع و فراوان، روشهای سنتی گرم کردن با آتش تند، تقریباً در همه‌جا تا پایان سدهٔ نوزدهم کافی بود. این روشها

عبارت بودند از استخراج الکل از آب میوه یا شراب تخمیر ناشده و تخمیر آنها، استخراج، تقطیر و بالاخره تقطیر دوبارهٔ آنها.

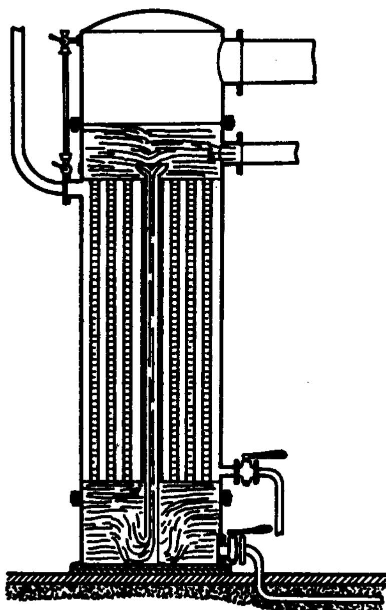
صنعت آبجوسازی، اگر به پیری خود جهان نباشد، اسناد اشرافیت خود را از دوران باستان دارد؛ گرم کردن دیگهای پخت جو با بخار، تا سال ۱۸۷۰ عمل نمی‌شد. این روش که طبعاً با احتیاط با آن برخورد شده است در زمانی عملی شد که صنعت آبجوسازی تعدادی وسایل مکانیکی، از جمله همزنهای گردان را از صنایع دیگر به عاریت گرفته بود. به‌هرحال این روش در اواخر سدهٔ نوزدهم به‌طور قطعی پذیرفته شد. تردیدی نیست که در صنعت آبجوسازی، تنها مقدار تقاضای بازار موجب تحولی در وسایل کار یا حتی احتمالاً روشها بوده است.

تقطیر الکلها: دربارهٔ تقطیر الکلها باید گفت که افزایش سریع مصرف در میانهٔ سدهٔ نوزدهم، از همان اوایل کار، تحول وسایل تقطیر مواد تخمیر شده را، از هر نوع که بودند، مطرح ساخت. آقای کامی ونسان[1] می‌نویسد که در پاریس، مصرف الکلهای خوراکی ظرف ده سال (از ۱۸۶۴) دو برابر شد (۲۸ لیتر برای هر نفر در سال) و از سال ۱۸۳۳ سه برابر. باز هم این مقدار، کم بوده است. سوئدیها (جز کودکان و «بخشی از زنان») هر نفر در سال ۸۰ تا ۱۰۰ لیتر الکل می‌نوشیدند. همین نویسنده بسادگی اظهار می‌دارد که «مصرف الکل در انگلستان هم چشمگیر است». وانگهی باید گفت که کاربردهای صنعتی الکل، بسیار بیشتر از مصرف خوراکی آن افزایش یافت. برای نگاهداری گیاهان و قطعات بدن گرفته تا بهتر کردن درجهٔ سرکه و شراب، کاربردهای علمی و دارویی، ساختن عطر، بویژه اودوکلنی و ورنیها به الکل نیازمندیم. این ماده در سپیده‌دم آینده بزرگ صنعتی، مثلاً کائوچو و کلودیون وارد چرخهٔ ترکیبی آنها شد.

برای پاسخگویی به این تقاضاهای جدید است که به استخراج الکل از مواد خام فراوان در طبیعت دست زدند تا بتوانند آن را یا از راه تخمیر، مثلاً چغندر، یا با تبدیل به قند، سپس تخمیر مثل دانه‌های حبوبات و بیش از همه، جو دوسر و جو، و سیب‌زمینی به‌دست آورند. عملیات پایانی، همیشه تقطیر و تقطیر دوباره بوده است.

وسیلهٔ تقطیر آقای دروسن بی‌تردید برای نخستین بار اصول گردش مایع از پایین به بالا و بخارها از بالا به پایین از داخل یک ستون دارای چندین بشقابک، گذار از، هر طبقه در حباب‌سازی به شکل ناقوس و برگشت در مدار مایعهایی که کاملاً تمام نشده‌اند را در داخل پراتیک صنعت کرد. نخستین اصلاحات این وسیله را آقای دوبرونفو وارد کرد، اصلاحاتی که به بشقابکها و حباب‌سازها مربوط می‌شد. پس از وی طرحهای مخترعان، انواع فراوانی از این وسیله را به نمایش گذاردند که

1. Camille Vincent



شکل ۱۸.دیگ بخار لوله دودی ساوال برای تقطیر الکل.
لوله عمودی، شراب ضعیف را به بالا می‌رساند. شراب در لوله‌های عمودی از پایین به بالا و از بالا به پایین ستون بخار آب گردش می‌کند. الکل بخش بالایی دستگاه را پر می‌کند و لوله‌ای که در بالا، سمت راست قرار دارد آن را خارج می‌کند. در پایین، سمت راست، شیر خارج کردن بخارهای مایع شده و در زیر آن شیر خارج کردن شراب عمل آمده است. بالا، سمت چپ، ورود بخار.

از اصل بنیادین تخطی نشده بود و تفاوت آنها با یکدیگر، تنها در شکل و ترتیبات دستگاه بود. ردیف وسایلی که آقای د. ساوال[1]، تقطیرکار فرانسوی، در لاهه طرح کرد موفقیت پردوامی داشت و تقریباً همهٔ آنها نیم سده درکار بودند. آقای ساوال بی‌شبهه اندیشهٔ استفاده از یک ماشین بخار لوله دودی برای گرم کردن موادی که می‌خواست آنها را عمل آورد (کاری که مثلاً برای شراب خام چغندر یک امتیاز بود) و نیز رقیق نکردن آنها را از آقای کل گرفته بود (شکل ۱۸). دستگاه ساوال را بویژه حدود سال ۱۸۷۰ آقای ماکس اشپرینگر[2] تقطیرکار اهل وین پذیرفت و درکارخانهٔ خود Maisons-Alfort از آن برای تهیه مخمر خالص آبجو استفاده کرد. این شخص اولین کسی بود

1. D.Savalle 2. Springer

که با خمیر مواد نشاسته‌ای که از حبوبات به‌دست آمده بود، این مخمر را تولید می‌کرد.

ساخت الکل از دانه‌های غلات با سرعت زیادی در هلند و بلژیک در آغاز نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم رواج یافت. در این کار تعدادی فراورده‌های جنبی به‌دست می‌آمد که چه از لحاظ غذای دام و چه به‌عنوان کود ارزش بازرگانی داشتند. قندی کردن در مجاورت دیاستازی انجام می‌گرفت که بوسیلهٔ مالت جو به‌دست می‌آمد. این عمل را همچنین از مدتها پیش بوسیلهٔ اسید کلریدریک در طشت سرباز انجام می‌دادند، که روش پرخرجی بود. در حدود سال ۱۸۷۰ کارکردن با اتوکلاو شروع شد، که، اولین نمونهٔ گرم‌کردن زیر فشار بود و صنعت شیمی آن را به خدمت گرفت. این روش در ۱۹۰۰ کاملاً جانشین گرم کردن در طشت سرباز شد.

استخراج قند: صنعت قندسازی از چغندر، موازی با صنعت تولید الکل، انگیزهٔ ساخت تجهیزات تازه‌ای شد که با کاربرد قطعات بزرگ و شیرآلات فلزی، مکانیکی کردن جابه‌جایی مایعات و بخار آب در تغییر شکل وسایل صنایع شیمیایی، به‌طورکلی تأثیر داشت. همین شیمیدانها و سازندگان وسایل که در تغییر وسایل تقطیر دست داشتند در اصلاح وسایل استخراج و تغلیظ شربتهای قند نیز تأثیر گذاشتند. معلوم است که چغندرقند در دوران محاصرهٔ قارهٔ اروپا در آغاز سدهٔ نوزدهم، مورد آزمایشهایی برای استخراج قند قرار گرفت. نخستین قندسازان فرانسوی، جز چند عمل ویژهٔ مربوط به نوع این ماده خام جدید، از روشهایی استفاده می‌کردند که از سده‌های پیش برای استخراج قند از نیشکر به‌کار گرفته می‌شد. پس از پایان جنگهای امپراطوری، صنعت بومی قند (این اصطلاح تا پایان سده برای قند چغندر به‌کار گرفته می‌شد) که تازه تولد یافته بود سالهای طویلی را در رکود گذراند. این صنعت از شمال فرانسه به بلژیک، آلمان، اروپای مرکزی و بعدها به روسیه راه یافت، اما تولید آن سقفی داشت زیرا واردات قند نیشکر که بخش بزرگی از آن در اروپا تصفیه می‌شد آن را محدود می‌کرد.

در سال ۱۸۲۸ هنوز تولید قندچغندر در فرانسه به ۳۰۰۰ تن نمی‌رسید. بعداً این تولید در سالهای ۱۸۳۵ـ۱۸۴۰ به حدود ۵۰۰۰۰ تن بالغ شد؛ اما در سال ۱۸۵۵ اختلال بزرگی در تولید، آن را به ۲۰۰۰۰ تن کاهش داد و این بخاطر شیوع نوعی بیماری در چغندرقند بود که به‌اندازهٔ کافی آن را نمی‌شناختند. این دوره‌ای بود که نخستین تجهیزات نوین ـ گرچه هنوز از جنبهٔ شکل و اصول کار، به تکنیک سنتی بسیار نزدیک بودند ـ به میدان آمدند. اما این موج نخست تحول، تنها بدین دلیل برخاست که بعضی از این تجهیزات، نخست برای بهره‌برداری در آن‌سوی دریا و بویژه جهت مؤسسات فرانسوی تولیدکنندهٔ قند در جزایر آنتیل و کوبا طرحریزی شده بودند.

پیشرفت صنعت بزرگ قندسازی اروپا در ۱۸۵۶ آغاز شد و با وجود نوسانهای اوضاع ادامه یافت. در فرانسه، تولید طی پانزده سال، چهار برابر شد: ۹۲۰۰۰ تن در ۱۸۵۶ و ۴۰۰۰۰۰ تن در فصل بهره‌برداری ۱۸۷۲ ـ ۱۸۷۳. با آغاز این دوره، قند یک غذای رایج و حتی همگانی شد و مصرف سرانهٔ آن در همهٔ کشورها، سریعاً افزایش یافت. این صنعت که بخوبی مجهز شده بود محصول زیادتر و بازار بیشتری یافت و از زمانی‌که عوارض مربوط به آن در همه‌جا به‌مقدار زیادی کاهش داده شد با سهولت بیشتری گردش یافت. این افزایش تقاضا سبب تکمیل و حتی در بعضی از قسمتها تغییر شکل تجهیزات صنعتی شد. در فرانسه تولید آن از یک میلیون تن در دوره بهره‌برداری ۱۹۰۰ ـ ۱۹۰۱ گذشت، درحالی‌که تولید قند در آلمان دو برابر، و در اتریش و روسیه کمی بیشتر از مقدار تولید آن در فرانسه بود. در ممالک متحدهٔ امریکا، مقدار تولید بین دوره‌های بهره‌برداری ۱۸۹۸ ـ ۱۸۹۹ و ۱۹۰۱ ـ ۱۹۰۲ پنج برابر شد (۱۶۳۰۰۰ تن در این دوره). گرچه در بازار جهانی، ممالک متحدهٔ امریکا در تولید قند از چغندرقند مقام پایینی داشت، در تولید قند از نیشکر، پس از کوبا، و در مقام دوم بود. این قند تقریباً فقط در لویزیانا تهیه می‌شد و مقدار آن در ۱۹۰۱ ـ ۱۹۰۲ به ۳۰۰۰۰۰ تن در برابر ۸۴۰۰۰۰ کوبا رسید.

پیشرفت قندچغندر مانع افزایش قند نیشکر نبود. در اواخر سدهٔ نوزدهم، تولید جهانی قند برای مصرف نیشکر (قند کلنیال) طی سه سال به یک میلیون تن رسید که ۲۵٪ تولید ۱۸۹۹ ـ ۱۹۰۰ بود.

بدین‌ترتیب، وفور یک مادهٔ غذایی اصلی از این نوع در نیمه دوم سدهٔ نوزدهم حاصل شد. در اینجا با نمونهٔ بسیار جالب پدیده‌ای روبه‌رو هستیم که امروز اقتصاد مصرف اصطلاح شده است. عوامل این پیدایش دقیقاً همانهایی هستند که بر نوآوریهای عظیم معاصر فرمان می‌رانند: بررسی آزمایشگاهی فراورده‌ای نسبتاً کمیاب، منجر به شناخت بهتر این فراورده در چارچوب تحول دانش بسیار جوانی به نام شیمی آلی شد؛ آغاز تولید یک ماده جانشین فراوردهٔ سنتی تحت تأثیر حوادث نظامی؛ تأثیر آرام در کار شرایط اقتصادی و صنعتی؛ توسعهٔ اولیه به برکت تعمیم وسایل حمل‌ونقل با بخار؛ پیدایش یک نظریهٔ ترمودینامیکی تغذیه و آشکار شدن قدرت زیاد گرمابخشی این فراورده؛ تکامل تکنیکهای تولیدی که بهای فروش را پایین می‌آورد و بالاخره موفقیت قطعی در پرتو نیازمندی کلی به یک تغذیه بهتر که می‌تواند (با افراط در خوردن یا در صرفه‌جویی) بخش روزافزونی از مردم کشورهای صنعتی را، در سایهٔ اقتصادی کلی مبادله، که جانشین اقتصاد روستایی شده است، فروش کار شخصی و خرید فراورده‌های مصرفی، راضی کند.

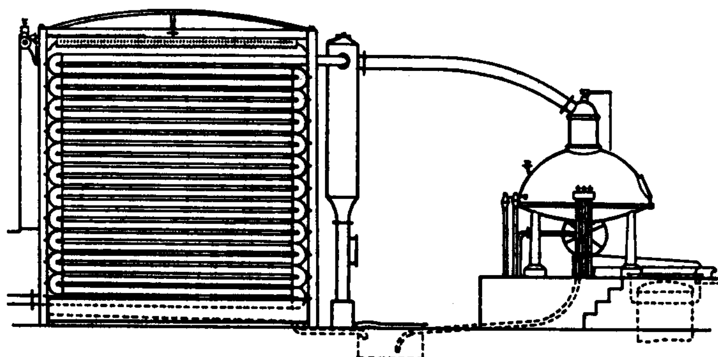
استخراج و تصفیهٔ قند، چه از نیشکر و چه از چغندر، متضمن یک رشتهٔ کارهاست که به محض اینکه بهره‌برداری اهمیت یافت، مکانیکی شدند. ماشین بخار در صنعت قندسازی دستاوردی اساسی بود. این ماشین نه‌تنها بالابرها، قطعات گردان شوینده، رنده‌ها، پرسها و تلمبه‌ها را به‌حرکت آورد، بلکه این بخار دیگ و بعدها بخاری که ماشینها را حرکت داده است، باعث گرم کردن دیگهای تصفیهٔ شربت خام با آهک، دیگهای کربنات گردانی که آهکی را که در شربت محلول است رسوب می‌دهد، دیگهای گرم کردن مجدد، پیش از تصفیه با زغال حیوانی و بالاخره دستگاههای چند منظوره برای پخت یا تغلیظ پایانی شربت شد. اگر دانسته شود که بعضی از این عملیات در یک دستگاه ویژه برای تخلیص تکرار می‌شود روشن خواهد شد که دامنهٔ کار این تجهیزات تا چه اندازه است و وسایل گرم‌سازی تا چه اندازه اهمیت دارند.

در دوران تکنیک سنتی همهٔ عملیات را با دست و گرم‌سازی را با آتش مستقیم انجام می‌دادند. زمانی‌که حجم مادهٔ مورد عمل در سالهای ۱۸۳۰ ـ ۱۸۴۰ چنان افزایشی یافت که حتی در کارخانه‌های مستعمرات هم، که مزد کارگر بسیار پایین بود، سرعت تولید و کیفیت تازه خلوص، سفید کردن و نیز هزینهٔ عرضهٔ کالا، که از این پس برای نگهداری رقابت قندهای نیشکر با قندهای چغندر تحمیل شده بود، مکانیکی کردن کارها و استفاده از بخار آب را ناگزیر ساختند.

تغلیظ در خلاء جزئی: میل به اختراع، همزمان در همهٔ بخشهای تجهیزات می‌جوشید، و با وجود تنگناها در کار تولید، راه دیگری در پیش نبود، این تلاش خلاق، کمی پس از آزمایشهای نخستین بهره‌برداری قندچغندر آغاز شد و تا اواخر سالهای ۱۸۵۰ ادامه یافت. برای گرم کردن، کاربرد بخار آب فوراً پذیرفته و پیشرفته شد و پیشرفتهایی که به مدت نیم سده در این مسأله که مرحلهٔ پایانی تغلیظ شربت است؛ ایجاد شد، اهمیت خاصی دارد. در سال ۱۸۱۲ آقای هوارد صنعتگر، نخستین دیگ تغلیظ در یک خلاء جزئی را ساخت؛ اما گویا این دیگ تا ۲۰ یا ۲۵ سال بعد به‌کار گرفته نشد. در این دوره، کار تغلیظ در دیگ سربازی انجام می‌گرفت که به توسط مارپیچ مسطحی که افقی در ته دیگ می‌گذاشتند، گرم می‌شد. آقای اونزیفور پکور[1] مکانیسین فرانسوی در سال ۱۸۳۵ دیگی از این نوع ساخت که در آن زمان، عالی ارزیابی شد.

آقای شارل دروسن در همان زمان گویا برای داماد خود، لبودی[2] که می‌خواست چند سال بعد در آنتیل یک کارخانهٔ قند تأسیس کند دیگی ساخت که با بخار گرم می‌شد و از آزاد شدن بخار حاصل از تغلیظ برای گرم کردن یک باتری مرکب از دو مارپیچ عمودی استفاده کرد. شربت که هنوز رقیق بود روی آن جریان می‌یافت و بدین‌ترتیب نخستین تغلیظ، پیش از اینکه به دیگ فرستاده

1. Onesiphore Pecqueur 2. Lebaudy



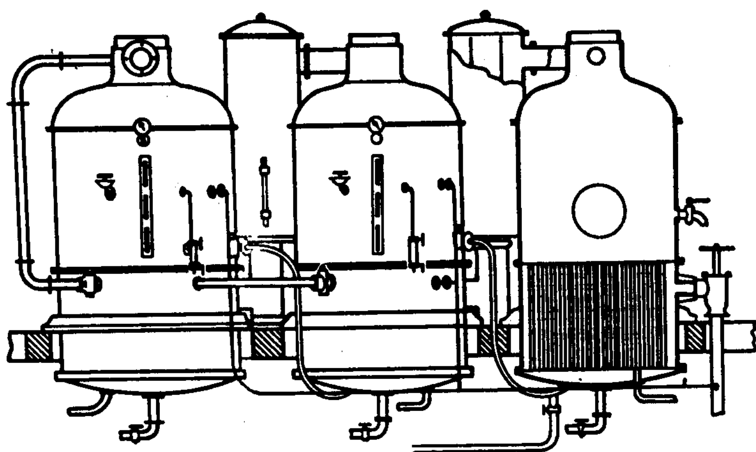
شکل ۱۹.دستگاه دروسن و کل برای تغلیظ شربت قندچغندر و نیشکر.
شربتی که زلال شده است، به بالای مارپیچهای سمت چپ برده می‌شود. بخار آب حاصل از تغلیظ در دیگ سمت راست، مارپیچها را گرم کرده‌اند. در پایین، سمت چپ، لولۀ مکش بخار دیده می‌شود. شربت پس از تغلیظ اولیه، از ظرف مرکزی به دیگی که دو سقف و دو کف دارد برای گرم شده با بخار آب رانده می‌شود. در وسط، در ستون عمودی، شربتی که جوش آمده است، جمع می‌شود.

شود انجام می‌گرفت (شکل ۱۹). در انتهای مارپیچ، تلمبه‌ای در لوله‌ها و دیگ، خلاء جزئی ایجاد می‌کرد. نخستین تغلیظ، که در هوای آزاد انجام گرفته است طبعاً در فشار جو بوده است.

این وسیله که بعدها آن را دو بخشی نامیدند به صرفه‌جویی در سوخت که در مستعمرات کم بود پاسخ می‌داد. در نواحی دیگر این وسیلۀ دو بخشی را در ستونی دارای قسمت مرکزی ایجاد کردند و بخارآب در آن تزریق می‌شد. آقای ریلیو[1] امریکایی اندیشید که به این نوع دیگ، بخش سومی را بیفزاید و بخش دوم و سوم، با بخارآب مرحلۀ تغلیظ گرم شوند. اما کسی که بتنهایی این مؤسسۀ مشترک را پس از ناپدید شدن آقای دروسن در سال ۱۸۶۴ عهده‌دار شد و در سال ۱۸۵۶ شکل قطعی این مؤسسه را تعیین کرد، کسی جز ژان ـ فرانسوا کل نبود.

مؤسسه دروسن ـ کل از ساختن تجهیزات قندسازی و تقطیر به میدان مکانیک گام نهاد و از تجربیات خود در تولید بخار برای ساختن ماشینهای بخار و لوکوموتیوها استفاده کرد. آقای کل اندیشه به‌کارگرفتن اصل دیگهای لوله دودی بخار را برای گرم کردن شربتی که باید تغلیظ می‌شد، پیش کشید (شکل ۲۰). هر سه بخش دیگهای وی مشابه یکدیگر بودند. بخش پایینی، دیگی با لوله‌های بخار گذر بود که شربت بین آنها به‌علت آثار ساده همرفتی (کنوکسیون) و جوشش،

1. Rillieux



شکل ۲۰.دستگاه تغلیظ سه بخشی ریلیو، ساختهٔ کل.
بخار از لوله‌های سمت راست وارد می‌شود و در لوله‌های پایین دیگ اول می‌گردد. شربت به جوش آمده است. لوله‌ای بخار آب شربت را می‌گیرد و در دیگ دوم، که مشابه اولی است وارد می‌کند. همین عمل بین دیگ دوم و سوم تکرار می‌شود. لوله‌هایی شربت را وارد دیگها می‌کنند.

میان بخش بالایی و کف دوگانه جریان می‌یافت. بخش نخست را بخار آبی که از ماشین بخار کارخانه خارج می‌شد گرم می‌کرد. دو بخش دیگر، برپایهٔ اصل ریلیو، یا بخارآب مربوط به تغلیظ شربت در یک یا دو دیگ گرم می‌شدند. یک تلمبهٔ هوا و آب با دیگ سوم از طریق یک چگالنده (کندانساتور) ارتباط می‌یافت تا آب و بخار آبی را که تشکیل شده است حذف و خلاء جزئی را که در دیگ نخست پیشرفته‌تر از دو دیگ دیگر است حفظ کند. این وسیله نخست در دمای ۸۰ تا ۷۰ درجه به‌کار می‌رفت و سپس در ۶۰ تا ۵۰ درجه، تا امکان حفظ دمای کافی، با کاربرد تنها بخار فراری از استوانهٔ ماشین وجود داشته باشد.

آقای کل، با چنین راه‌حل عالی در اصول، توانست دستگاهی آن‌چنان رضایتبخش بسازد که دستگاههای سه بخشی وی، مدلی از گرم کردن صنعتی شدند که در شاخه‌های متعددی از تولید، هنوز کاربرد دارند.

بدین‌ترتیب، صنعت تهیهٔ الکل، همزمان با قندسازی، انگیزهٔ پیدایش و سپس گسترش صنعت دستگاههایی کاملاً جدید در رشتهٔ صنایع شیمی در سدهٔ نوزدهم بودند و سراسر در تکنیک پیچیده‌ای

وارد شدند که در این دوران ایجاد شده بود ـ تکنیکی که کاملاً از ساخت دیگ ماشین بخار و وسایلی که از آن منشعب می‌شدند الهام گرفته بود. لازم است بدین نکته هم توجه داشت که این تحول تکنیکی در این موقعیت، همگن بود: دیگ‌سازی، بعد ساختهای متالورژی که به ریخته‌گری، ماشینهای ابزار (فرآیندهای مکانیکی برای سوراخ کردن مهره‌ها)، پیچ‌سازی و غیره تکیه داشت.

این تجهیزات از قطعات استاندارد فلزی، مس، ورق آهن یا چدن تشکیل شده بودند که به یکدیگر پیچ و مهره می‌شدند و تنه‌های حجیم آب‌بندی شده‌ای تشکیل می‌دادند که در گذر نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم برای کارهای تقطیر جزء‌به‌جزء و تقطیر دوباره سبب شد که گروههایی از فراورده‌ها در مقیاس صنعتی ساخته شوند که به‌طورکلی در سالهای ۱۸۶۰ ـ ۱۸۷۰ به بازار سرازیر شدند و به‌مقدار زیاد در سالهای ۱۸۹۰ ـ ۱۹۰۰ به‌کار گرفته شدند.

عمل آوردن مواد چرب: صنعت مواد چرب که پس ازکارهای میشل اوژن شورول[1] (۱۸۱۳ ـ ۱۸۲۳) گسترش زیادی یافته بود، مانند صنایع دیگر دستخوش تحولاتی شد و از وسایلی که برای آن طراحی شده بودند و بر همان اصول ساخته شدند، استفاده کرد. این صنعت، هم روش گرم کردن در خلأ و هم گرم کردن همراه با فشار را ضمن نوسازی وسایل گرم‌کننده، به‌کار گرفت.

روش صابونی کردن پیه برای استخراج اسید استئاریک، با اثر دادن آهک در ظرف سربازی انجام می‌گرفت که با مارپیچی که آب گرم از آن می‌گذاشت گرم می‌شد. در سال ۱۸۵۵ آقای میلی[2] نخستین سازندهٔ شمعهای استئاریکی در بیست سال پیش، توانست در یک اتوکلاو استوانه‌ای، در فشارهایی که به هشت اتمسفر می‌رسید، دو تن پیه را یکباره مورد عمل قرار دهد. با این روش، هم مصرف آهک و هم اسید سولفوریک مصرفی برای آزاد کردن اسید استئاریک صابون (این عمل در دیگ دیگری انجام می‌گرفت)، و نیز اتلاف مواد چرب کاهش می‌یافت. سرانجام، تهیهٔ گلیسرین نیز، در زمانی‌که صنعت بدان به‌عنوان یک مادهٔ خام مفید نیاز یافته بود، آسان شد. اتوکلاو آقای میلی مقام خود را تقریباً از سال ۱۸۸۰ تا حدودی به اتوکلاو کروی ل. درو[3] واگذاشت. اما، با وجود این، چندین دههٔ دیگر نیز فعال بود. همین آقای درو صنعتگر، کمی بعد راه تقطیر کردن اسیدهای چرب را با گرم کردن در خلأ یافت.

آقای آخارت شیمیدان آلمانی، در پایان سدهٔ هجدهم ثابت کرد که مواد چرب را می‌توان با اسید سولفوریک صابونی کرد. مکانیسم این واکنش را شورول در ۱۸۲۴ بررسی کرد اما ازکاربرد صنعتی آن تا مدتها عاجز بود تا اینکه آقای دوبرونفو در ۱۸۳۶ و پس از وی آقایان توماس و

۱. M.E.Chevreul (۱۷۸۶ ـ ۱۸۸۹): شیمیدان فرانسوی.

2. Milly 3. L.Droux

لورنس در ۱۸۳۷ برای خالص کردن اسیدهای چرب از راه تقطیر کوشیدند. گرم کردن آنها با بخار آب انجام می‌گرفت که مستقیماً در دیگ محتوی اسیدها تزریق می‌شد. بخار آب نه‌تنها اسیدها را تا دمای جوش گرم می‌کرد بلکه همزن آنها را هم می‌گرداند. در ۱۸۴۳ آقایان جان و ویلسن در انگلستان روشی را به ثبت رسانیدند که از بخار داغ آب استفاده می‌شد. در پایان آقای ل. درو به انتهای دیگ تقطیر یک تلمبهٔ چگالشی یا میعانی نصب کرد تا بتواند خلاء جزئی، ۳۰ سانتیمتر جیوه، ایجاد کند. با این روش، کار تقطیر شتاب گرفت و شرایط آن بهتر شد.

بدین‌ترتیب، استئارین در کمتر از ۵۰ سال توانست وسایلی برای گرم کردن بیافریند و به کار گیرد که در شاخه‌های دیگر شیمی صنعتی برای کارهای بسیار متفاوت از آنها استفاده شد. صنعت کلاسیک تهیهٔ نمکهای معدنی در بسیاری از تولیدها، وسایلی برای تبخیر و نمگیری ایجاد کرد که در خلاء جزئی عمل می‌کردند. این وسایل که اساساً به‌عنوان تجهیزات صنعت قند شناخته می‌شوند از سالهای ۱۸۸۰ ـ ۱۸۹۰ جای تأسیسات پلکانی صنعت سنتی تهیهٔ نمک را گرفتند و آنها تنها به‌عنوان دکوراسیون در سواحلی از دریا حفظ شده‌اند.

تقطیر خشک مواد طبیعی

فراورده‌های تقطیر چوب: روشها و دستگاههای تقطیر، در سالهای ۱۸۷۰ ـ ۱۸۸۰، زمانی‌که استخراج فراورده‌های تصعیدی چوب و سپس مواد فسیلی، لینییت، شیست و نفت آغاز شد بسیار به‌هنگام به‌کار گرفته شدند. در مورد زغال‌سنگ باید گفت که دستگاههای تقطیر این مادهٔ خام، خالص کردن و توزیع گاز و عمل آوردن فراورده‌های جانبی در فرجهٔ ۱۸۳۰ ـ ۱۸۵۰ به‌کار گرفته شدند و مدتی نزدیک به یک سده، دستخوش تحول بسیار آرامی بودند، تنها روشهای تقطیر و تجزیهٔ جزءبه‌جزء هیدروکربنهای زغال‌سنگ که در شروع ساخت رنگهای مصنوعی ارزشمند شدند، به پیشرفت خود تحت تأثیر صنایع دیگر تقطیری ادامه دادند.

تقطیر خشک چوب و فراورده‌های دیگر فسیلی در سدهٔ نوزدهم را نمی‌توان نوآوری به‌شمار آورد. اینها، شرایطی برای ایجاد نوآوری بودند و هدفهای جدید این عملیات، افزایش مقدار مادهٔ مورد عمل و طولانیتر کردن ردیف فراورده‌هایی بود که به بازار سرازیر شدند تا تغییر شکل کار پیشه‌وری را به شاخه‌ای از صنعت بزرگ شیمی اعلام دارند.

فراورده‌های جانبی تصعیدشونده مربوط به تقطیر چوب در سالهای ۱۸۵۰ تا ۱۸۶۰ با شتاب تمام دارای ارزش کالایی بسیار بیشتر از زغال‌چوب شدند که به‌طور سنتی، تنها فراوردهٔ قابل فروش

جدول ۱. فراورده‌های تقطیر چوب

- چوب
  - اسید ناخالص تقطیر خشک چوب
    - اسیداستیک ناخالص
      - تقطیر خشک آهک گندمگون
      - تقطیر خشک آهک خاکستری
        - اسیداستیک صنعتی
        - استون
          - کلروفرم
          - یدوفرم
      - شیر آهک استاتی
      - پیرولینیت سدیم
      - استات سدیم متبلور
      - استات سدیم برفی
      - استات سدیم مذاب
        - استات مس (سبز خنثی)
        - اسیداستیک خوشمزه برای کنسروها
      - پیرولینیت سرب
      - استات سرب
      - پیرولینیت آهن
      - استات آلومین
    - متیلن ناخالص
      - متیلن ناخالص برای ساخت بعضی ورنیها
      - متیل برای الکل تقلبی
        - فرمالدئید
    - قطران چوب
      - کرئوزوت
        - کربنات کرئوزوت
        - فسفات کرئوزوت
        - تانو فسفات کرئوزوت
        - کرئوزوفرم (ترکیب کرئوزوت و فرمالدئید)
        - تانوکرئوزوفرم
      - گایافرم
        - گایاکول مایع
        - گایاکول متبلور طبیعی
          - کربنات گایاگول
          - فسفات گایاگول
          - گایا فرم
          - تانوگایافرم
      - قیر
  - زغال چوب
    - خرده زغال روشن
    - گرد و غبار
      - دوده
      - بریکت

این جسم بود. این جابه‌جایی هدفها در همان زمانی انجام گرفت که رشته سیدرورژی، در فرانسه بتدریج، از کاربرد زغال‌چوب به نفع کک چشم پوشیدند.

اما چنین نیست که بهره‌گیری از فراورده‌های جانبی، که تا نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم کاملاً نادیده انگاشته می‌شدند، گرایشی برای جانشین کردن و بقصد نجات صنعتی از اضمحلال باشد. تقطیر چوب، آن‌چنانکه در میانهٔ این سده انجام می‌گرفت، در قرع فلزی که گردآوری فراورده‌های تصعیدی را ممکن می‌ساخت، واقعاً صنعتی متفاوت از کار تهیهٔ زغال در سده‌های پیش بود.

در مراحل نخستین این صنعت نوین، تنها فراورده‌ای که استخراج می‌شد اسید استیک بود که در صنعت آن را اسید پیرولینیو یا بسادگی پیرولینیو می‌گفتند که اشاره به منشاء آن داشت. تخمیر

استیکی شراب تا مدتها باز مهمترین منشاء اسید استیکی بود که در صنعت برای تهیهٔ سفیداب شیخ $[2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2]$ یا استات آلومین برای رنگ و استاتهای دیگر معدنی، مثلاً: سرب، مس و آهن به‌کار گرفته می‌شد. حدود سال ۱۸۷۰ بود که پیرولینیت آهک که با اسید کلریدریک، به‌اصطلاح «اسید هنرها» را از آن می‌گرفتند جانشین اسید استیک سرکه‌ای شد که دیگر تنها در مصارف پزشکی، فراورده آزمایشگاهی و ساخت سرکه کاربرد داشت.

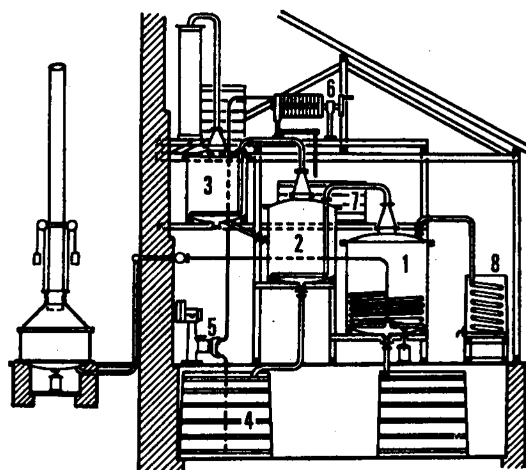
در پایان باید گفت که بیست سال پس از این تاریخ، فراورده‌های تقطیر جزءبه‌جزء اسید استیک ناخالص، دیگر فهرست بلند بالایی از ترکیباتی را تشکیل می‌دادند که مواد خام مهمی برای شمار روزافزونی از صنایع بودند.

انواع بسیار گوناگونی از قرعهای مربوط به تقطیر خشک خود چوب، بی‌درنگ به‌کار گرفته شدند. در آغاز، گزینش این مادهٔ خام می‌توانست در سرنوشت گیاهان بسیار تأثیر گذار باشد. در حقیقت درختهای ۱۸ تا ۲۴ ساله را به‌کار می‌بردند. آنها را می‌بریدند و به مدت یک سال برای خشک شدن رها می‌کردند. خوشبختانه پیش از آنکه مصرف این چوب خیلی زیاد شود به استفاده از آخالها و خاک ارهٔ کارگاههای بخاری و مبل‌سازی روی آوردند. برپایهٔ روشی که در آن زمان برای ساختن کوره‌ها رایج بود، قرعها با تماس مستقیم با آتش گرم نمی‌شدند بلکه از گازهای گرم ناشی از سوختن زغال‌سنگ برای این کار استفاده می‌شد و این گازها از گربه‌روها یا شیبهایی به زیر قرع هدایت می‌شدند. مخلوط اسیدهای چوب (پیرولینیو) را سپس برطبق اصول معمول در صنعت الکل‌سازی، تقطیر جزءبه‌جزء می‌کردند (شکل ۲۱). گرم کردن با بخارآب نیز طبعاً در کارهای تکمیلی مربوط به تهیهٔ استاتهای قهوه‌ای یا خاکستری، آهکی، سپس برای استخراج اسید استیک و استون، تقطیر دوبارهٔ الکل متیلیک و از بین بردن قطران‌ها عمل می‌شد.

رواج این فراورده‌ها در بیست سال پایانی سدهٔ نوزدهم روزافزون بود. از این فراورده‌ها برای تهیهٔ موادی از قبیل کلرومتیل برای دستگاههای ساخت آینه، و مواد دیگری برای تهیه مواد رنگ‌کننده، استخراج روغنهای اسانسی در عطرسازی و سرانجام مواد بیهوش‌کنندهٔ مخصوص جراحیهای کوچک، استون که در ساخت باروتهای بی‌دود، کلروفرم، یدوفرم، استات اتیل که آن نیز در ساخت مواد محترقه مصرف داشت، استفاده می‌شد.

تقطیر مواد فسیلی: تخریب خشک مواد فسیلی برای تولید گاز زغال‌سنگ، در آغاز گاه‌به‌گاه و سپس در سالهای ۱۸۵۰ ـ ۱۸۶۰ به‌طور پیگیر با لینییت، تورب و شیستهای قیری انجام می‌گرفت.

در فرانسه روش تخریب خشک مواد اخیر از سال ۱۸۱۸ مورد بررسی بود اما تنها با تأسیس



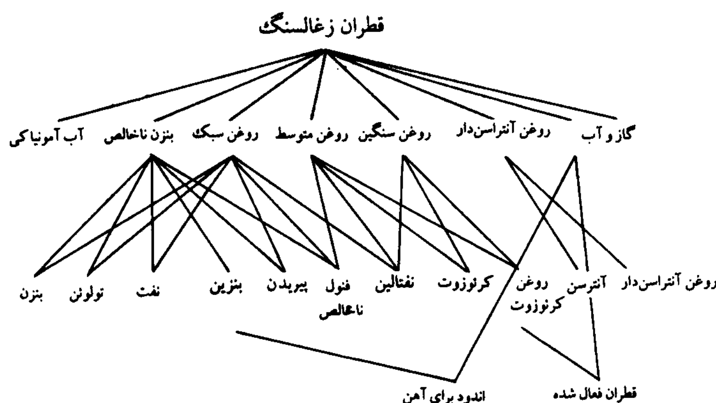
شکل ۲۱.کارگاه تقطیر جزءبه‌جزء اسیدهای چوب.
سمت چپ، دیگ تهیهٔ شیر آهک که در طبقات مختلف تقطیر توزیع شده است. فراوردهٔ ناخالص نخست در قسمت ۱ تقطیر می‌شود، آنگاه قسمت ۲ و ۳ را می‌گذراند و با برگشت فراورده‌های خنثی شده، وارد ۴ می‌شود. تلمبهٔ ۵ مایع را می‌گیرد و از فیلتر پرس ۶ می‌گذراند و در ظرف ۷ جمع، و از آنجا به دیگ تبخیر فرستاده می‌شود. در قسمت ۸ اسید استیک مستقیماً استخراج می‌شود و از آن برای اسیدی کردن مجدد مایع دیگها استفاده می‌شود. عمل گرم کردن در همه‌جا با بخارآب است.

شرکت گازهای قابل حمل در پاریس در ۱۸۳۶، جنبهٔ صنعتی به خود گرفت. با این روشها تا سال ۱۸۵۰ به‌طور جدی برخورد نکرده بودند. در این سال آقای اوگون که نام وی همچنین با انواع نخستین موتورهای درونسوز که با گاز روشنایی کار می‌کردند همراه است آن را وارد صنعت کرد. در واقع گاز مادهٔ شیستی بزودی بی‌اهمیت شد، اما تقطیر قطران شیستی مدتها برای استخراج هیدروکربنهای سبک، پارافین و آمونیاک، عمل می‌شد. بزودی باگهد baghead (شیست اسکاتلند) را که از لحاظ فراورده‌های قیری از شیست موجود در اوتون[1] غنیتر، و رگه آن نیز بسیار مهمتر بود واردکردند.

لینییت نیز از پارافین تهیه می‌شد و آن را بعدها در فراورده‌های تقطیر نفت یافتند. اما باز شمار زیادی فراورده‌های دیگر، کم‌وبیش شناخته شدند. بویژه در ساکسونی این روش به‌کارگرفته می‌شد و فهرستی از فراورده‌های تقطیر جزءبه‌جزء قطران آن به‌دست آمده بود شخص را تحت تأثیر قرار

۱. Autun: ناحیه‌ای در سون ـ ا ـ لوار کنار رودخانه آرو، در فرانسه.

جدول ۲.فراورده‌های تقطیر قطرانهای زغال‌سنگ



می‌داد. جدول بالا تصور دقیقی از انعطاف‌پذیری روشهای تقطیر، با تکمیلهایی که در اواخر سدهٔ نوزدهم در آنها طی سال پیاپی انجام گرفته است به‌دست می‌دهد.

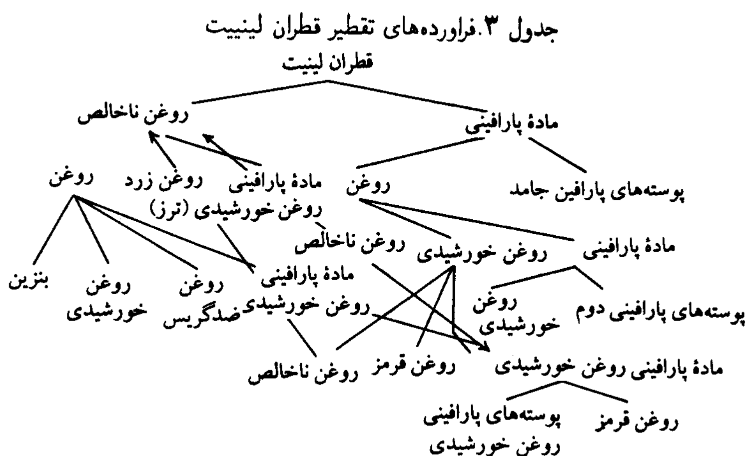
گوناگونی فراورده‌های استخراجی از قطران زغال‌سنگ نیز گسترده بود. چون تخریب خشک زغال‌سنگ بیش از لینییت اهمیت داشت مقادیر موجود از آن در بازار بسیار فراوانتر بود. اما رقابتی بین این دو رشته وجود نداشت زیرا مشتقات زغال‌سنگ اساساً از نوع ترکیباتی از ردیف آروماتیک (کربیدهای حلقوی) بودند و حال آنکه مشتقات لینییت، اصولاً از ردیف ترکیبات چرب (همرده‌های بالاتر از متان یا از اتیلن) بودند.

تجهیزات تقطیر طبعاً از دستگاههای تکمیل شده برای صنعت الکل‌سازی گرفته شده بود. آقای د. ساوال در این شاخهٔ اخیر نیز برای استخراج بنزن، یک ستون تقطیر دارای بشقابکها و حبابسازهاو نیز چگالنده (کندانسور)ای ساخت که با وزشهای منقطع دمی که ماشین بخار آن را می‌گرداند، خنک می‌شد. توسعهٔ صنعت گاز روشنایی و بهره‌برداری از وسایل تقطیری که بیش از پیش تکمیل شده بودند. سبب شد که در بیست سال پایانی سدهٔ نوزدهم بهای ۱۰۰ کیلوگرم بنزن از ۵۰۰ فرانک (حداکثر بها) به ۲۵ فرانک (بهای میانگین) پایین آید.

بهره‌برداری از روغنهای شیست، لینییت و تورب، در سالهای ۱۸۶۰، زمانی‌که نفت رواج بسیار زیاد خود را آغاز کرده بود، در رقابت شدید با آن افزایش یافت.

نخستین تقطیر صنعتی نفت: روشن است که شناسایی رگه‌های نفتی، در مواردی، از دوران باستان آغاز شده است. از سویی طی سده‌ها، نفت یا آن چیزی که ما اکنون بدین نام می‌شناسیم

جدول ۳. فراورده‌های تقطیر قطران لینییت



با ترشحات سنگهای یا شنهای قیری اشتباه می‌شد. با این‌حال، در گذشتهٔ بسیار دور، کوششهای مکرر برای استخراج نفت مایع، طبعاً ناخالص، در مناطق مختلفی از جهان را می‌توان تشخیص داد. نیز روشن است که فراورده‌های استخراج شده تنها مصرف دارویی داشته‌اند. بهره‌برداری از این منابع در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم گسترش یافت. بهای هر لیتر نفت (بدون در نظر گرفتن مشخصات آن)، در پیتسبورگ از ۲۳٫۷۵ فرانک، بین سالهای ۱۸۰۰ و ۱۸۴۳ به ۱٫۲۵ فرانک کاهش یافت. چنانچه این ارقام خیلی دقیق نباشند لااقل حدود را به ما نشان می‌دهند. تقطیر نفت، حدود سال ۱۸۵۰ در امریکا آغاز شد و در آن زمان بعضی از فراورده‌های تقطیر را برای روشن‌سازی مورد استفاده قرار می‌دادند.

بی‌شبهه با حفاری کاپیتن دریک[۱] در تیتسویل[۲] که در ۲۷ ماه اوت ۱۸۵۹ در عمق ۲۲ متری به یک سفرهٔ نفتی فوران‌کننده رسید، دوران صنعت نفت آغاز شد. در واقع نه از لحاظ نفس اکتشاف و نه از جنبهٔ حفاری، کار تازه‌ای نبود. پیش از وی کارهای بهتری شده بود. تنها یک اتفاق خوب به وی خدمت کرد و آن این بود که کار فرمایان وی از کاربرد نفت مطلع بودند و کسان زیادی کار او را تجدید کردند.

موفقیت تقریباً بی‌درنگ این استخراج بی‌تردید مدیون نتایج تقطیر است که نفت خام را بی‌درنگ در معرض آن قرار می‌دادند. روش تقطیر همان بود که مواد فسیلی دیگر و چوب متحمل آن می‌شدند. در این کار، خود را در برابر ستون جدیدی از ترکیبات هیدروژنی کربن یافتند که جدا کردن

۱. Drake، ادوین لونتین (۱۸۱۹ ـ ۱۸۸۰).

۲. Titusville: شهری در شمال‌غربی ایالت پنسیلوانیا، ممالک متحده امریکا

آنها از یکدیگر همان‌قدر دشوار بود که انواع هیدروکربنهای مختلف: به ترکیبات راست زنجیر اشباع شده یا ناشده، ترکیبات حلقوی. نامگذاریها بی‌قاعده، فوری شروع شدند که در هر ناحیه یک جور بود و بعضی از آنها هنوز هم، بدون اینکه فراورده‌های یکسانی را بپوشانند، حفظ شده‌اند: گازولین (یا اتر نفت)، نفت، نفت چراغ، وایت اسپیریت. بدین‌ترتیب، کار تقطیر بیش از امکانات کاربرد فوری خانگی یا صنعتی آن، سبب موفقیت نفت شد. نفت خام به شکل مخلوطی از ترکیبات گوناگون، خود را نشان داد و به فراورده‌های دیگر استخراجی، بسیار شبیه بود و گوناگونی آنها را می‌توانست افزایش دهد. کنجکاویهای کسانی که در آزمایشگاه کار می‌کردند همان اندازه تحریک شده بود که طمع مقاطعه‌کاران که با این منبع ثروت، در آینده بسیار پولدار می‌شدند.

گرچه این صنعت در این زمان هنوز فاقد تکنیکهای پیشرفتهٔ تقطیر بود بی‌شبهه فن استخراج نفت‌خام هم با کندی بسیار به پیش می‌رفت. این کار با استفاده از روشهای عمل آوردن روغنهای قطران زغال‌سنگ، روشهای خالص کردن با اسید سولفوریک یا سود انجام می‌گرفت. همهٔ اجزای تقطیر نفت خام و فراورده‌هایی که با تقطیر مجدد هرکدام از اجزا به‌دست می‌آمدند متحمل مرحلهٔ خالص‌سازی شیمیایی می‌شدند. بدین‌ترتیب، این صنعت تازه که می‌رفت تا در دهه‌های دوم و سوم سدهٔ بیستم یکی از عوامل اقتصادی و فنی پیشرفت تمدن صنعتی شود در آغاز با فروتنی بسیار در مسیرهایی از تکنولوژی لغزید که از پیش معین شده بودند.

رونق فراورده‌های نفتی: رونق این فراورده‌ها ظاهراً با لختی بسیار بود. در آغاز بخشهای متوسط تقطیر، نفت سفید، بود که برای روشن‌سازی به‌کار گرفته شد. گاز شهری بسیار کمتر از آن بود که همهٔ محلات و خانه‌ها را روشن سازد. شمع استثاریکی، با آن‌همه رواج و راحتی، نور چندانی نداشت. «روغن نفت» در سالهای ۱۸۶۰ جانشین روغنهای گیاهی منداب و میخک شد و بیست سال بعد کاربردی عمومی یافت. در اینجا هم اطلاعات تکنیکی کاملاً آماده بودند. تنها می‌بایست چراغ روغنسوز با دو جریان هوا و یک شیشه استوانه‌ای را که در آغاز سده اختراع شده بود برای استفاده از قدرت روشنایی بیشتر نفت، کمی اصلاح کرد. بازار از چشم دور نمانده بود، زیرا لااقل در کشورهای اروپا و امریکا پیش‌بینی می‌کردند که چراغ نفتی عملاً تا ۲۰ یا ۳۰ سال دیگر در همهٔ آتشدانها و همهٔ دفاتر کاری که گاز شهری دریافت نمی‌کنند وارد خواهد شد و انواع گوناگونی خواهد داشت.

سبکترین بخش تقطیر، بنزین، بی‌درنگ به‌عنوان حلال صنعتی به‌کارگرفته شد. اما مصرف‌کنندهٔ اصلی این بخش، موتورهای درونسوز، حدود سال ۱۸۶۰ برای نخستین بار، به‌جای گاز روشنایی

از بنزین استفاده کردند. گسترش صنعت موتورهای بنزینی، تنها در سالهای پیش از جنگ جهانی اول، در نقشه‌های فنی و اقتصادی آغاز به خودنمایی کرد. این حالت هنوز تنها در امریکای شمالی دیده می‌شد. در واقع در طی سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۳۰ بود که بنزین اتومبیل و هواپیما برای اقتصاد جهانی و ارتش هر کشور، به فراورده‌ای اساسی تبدیل شد. پس از جنگ جهانی دوم، با رواج موتورهای دیزل، فروش گازوییل که تا آن زمان در حالت رکود بود وارد دوران شکوفایی خود شد.

در آن زمان صنعت نفت در اقتصاد جهانی اهمیت چشمگیری یافته بود.

آخرین رونق فراورده‌های نفتی در نخستین مراحل بهره‌برداری نیز با لختی بسیار همراه بود. این رونق مربوط به بخشهای بسیار سنگین دستگاه تقطیر ـ چربیها و روغنهای گریس ـ بود. برخلاف تصور عده‌ای، این فراورده‌ها گویا با قدری تردید از سوی مکانیسین‌ها به‌عنوان لیزانه یا مادهٔ روغنکاری پذیرفته شدند. مشکل روغنکاری را با مواد موجود ـ روغن زیتون، روغن منداب، چربیهای گیاهی و حیوانی، گاهی مخلوط با گرافیت، روغن صمغ و پارافینهایی که از موم معدنی، بویژه لینییت و روغنهای شیست، به‌دست می‌آمد ـ برطرف می‌کردند. این فراورده‌ها که، با دقت، کمترین مقدار اسید آن گرفته می‌شد مشخصات مناسبی داشتند زیرا مکانیک صنعتی طی یک سده از پیشرفت پیوسته‌ای برخوردار بوده است. آنها با متن تکنیکی که در آن راه یافته بودند ـ مصالح موجود برای ساخت، کیفیت وسایل انتقال حرکت، سرعت گردش یا لغزش نسبتاً محدود ـ سازگار بودند.

یقین است که چنانچه روغنکاری با روغنها و گریسهای معدنی استخراجی از نفت، دخالت نمی‌کردند موتورهای فنی نوین نظیر موتورهای درونسوز و اتومبیلها، تا پایان سدهٔ نوزدهم احتمالاً ساخته نمی‌شدند. در برههٔ ۱۸۸۰ ـ ۱۸۹۰ بود که کاربرد روغنهای نفتی مخلوط با لیزانه‌های دیگر گیاهی یا حیوانی شروع شد. یک دهه پس از این تاریخ، منحصراً گریسهای نفتی در ماشینها به‌کار گرفته شدند. کنار گذاشتن کلی روغنهای گیاهی تا سال ۱۹۰۰ و حتی ۱۹۱۰ قطعی نبود و عادتهای محلی تا مدتها پابرجا بودند.

به‌هرتقدیر، تولید جهانی نفت بسرعت افزایش می‌یافت و مقدار آن از ۸۴۰۰۰۰ تن در ۱۸۷۰ به بیش از ۱۵ میلیون تن در ۱۸۹۶ رسید. دو تولیدکنندهٔ اصلی آن، یکی ممالک متحدهٔ امریکا با هشت میلیون تن و روسیه و قفقاز با شش میلیون تن بودند.

سودآوری این استخراج و نیز حس کنجکاوی برخاسته از استخراجهای صنعتی اولیه در پنسیلوانیا، بی‌درنگ مشوق اکتشافات نفت در سراسر جهان شدند. در کشورهای معدودی سنت رایج مانع توجه مردم به رگه‌هایی بود که استخراج آنها می‌توانست زندگانی را رونق بخشد. در واقع

نفت در همه‌جا یافت می‌شد: در هانور، آلزاس، گالیسی (که در آن زمان در تملک اتریش بود)، رومانی، کریمه، قفقاز، سیبریه، ایران، برمه، جاوه، چین، ژاپن، آفریقای مرکزی، جنوب استرالیا، کوبا، مکزیک، ونزوئلا، پرو، بولیوی، برزیل و آرژانتین.

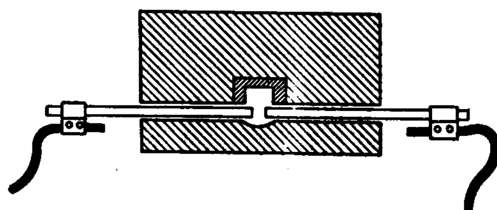
بعضی از این معادن پس از مدت کوتاهی یأس‌آور شدند و تعدادی پس از گذشت نیم سده غنای خود را نشان دادند؛ تنها معادن موجود در ممالک متحدهٔ امریکا و روسیه مورد بهره‌برداری قرار گرفتند که در پایان سده، تقریباً همهٔ تولید جهانی از این دو کشور بود. همه می‌دانند که از آن زمان به بعد، جغرافیای نفت تغییر زیادی داشته است.

این موفقیتها یک تأثیر فنی نیز داشته‌اند. آنها انگیزهٔ کوششهایی برای تکمیل وسایل تقطیر موادی از جنس دیگر ـ شیست، زغال‌سنگ و لینییت ـ بودند. در چنین کوششهای تب‌آلودی که روحیهٔ مقاطعه‌کاری نفتگران امریکا بانی آن بود، تجهیزات این صنایع گوناگون متحول شدند و کارایی آنها نیز افزایش یافت. این مجموعهٔ غنی، طی سه چهارم سده، بیشتر مواد خام مورد نیاز شاخه‌های نوین صنعت شیمی برای ساخت فراورده‌های صنعتی را تأمین می‌کردند. از سوی دیگر، می‌توان گفت که این تحول صنعت نفت بود که نابودی تدریجی تقطیر مواد دیگر ـ در آغاز قیر و شیست و بعد، تورب و لینییت و سرانجام در میانهٔ سدهٔ بیستم، تقطیر زغال‌سنگ را، که یکی از عناصر برتر مجموعهٔ تکنیک کلاسیک سدهٔ نوزدهم بود ـ باعث شد.

کوره‌های برقی

آخرین روش گرم کردن که در صنعت شیمی در سالهای پایانی سده نوزدهم به‌کار گرفته شد، کورهٔ برقی بود. کاربرد صنعتی آن پس از کارهایی بود که در سالهای ۱۸۹۲ و ۱۸۹۳ آقای هانری مواسان[1] را بلند آوازه کرد. اما متالورژی در این دوران از کورهٔ برقی از همان زمانی‌که آقای زیمنس در سال ۱۸۷۹ نخستین مدل آن را برای ذوب آهن ساخت، استفاده می‌کرد. در برههٔ ۱۸۸۵ ـ ۱۸۹۰ الکترومتالورژی بسرعت رونق گرفت. این امر در محیطی سرشار از شوق به فن و دانش اتفاق افتاد. مُواسان در سال ۱۸۹۲ اعلام داشت که وی به‌طور تصادفی می‌توانسته است در کوره‌ای با دو الکترود ـ که بین آنها یک قوس برقی پیوسته ایجاد می‌شد تا یک بوته یا لولهٔ زغالی حاوی مواد بررسی گرم شوند ـ کاربید کلسیم تهیه کند. آقای مواسان برای تمرکز گرما بر محوطهٔ واکنش، در داخل یک مکعب نسوز از سنگ آهکی که درون آن با منیزیم پوشیده شده بود یک قوس برقی ایجاد کرد (شکل ۲۲). وی بدین‌ترتیب توانست به دماهای ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دست یابد.

1. H.Moissan



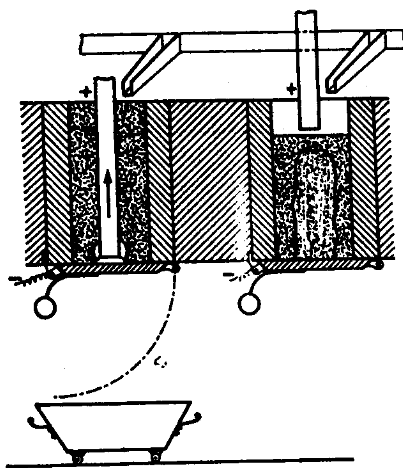
شکل ۲۲. مقطع کوره با قوس برقی آقای مواسان.

ساخت کاربید کلسیم: کربیدهای قلیاییهای خاکی ناشناخته نبودند. کاربید کلسیم با روش شیمیایی، احیای آهک بوسیله روی و کربن در دمای قرمز سفید، در سالهای ۱۸۶۱ ـ ۱۸۶۲ بوسیلهٔ فریدریش ولر به‌دست آمده بود و کربید باریم در همین سال ۱۸۶۲ بوسیلهٔ ماکن[1] شیمیدانهای دیگری مانند ادمند دیوی[2] در سال ۱۸۳۶ و آقای برتلو در ۱۸۶۶ برای تهیه کربید پتاسیم یا سدیم کوشیدند و آن را تهیه کردند. سرانجام، در سال ۱۸۹۳ آقای تراورز[3] شیمیدان انگلیسی موفق شد که با واکنش دادن مضاعف سدیم و زغال، کلرورکلسیم را به کاربید احیا کند. در همهٔ این موارد، مشاهده‌کنندگان تذکر داده‌اند که اثر آب روی این ترکیبات ایجاد استیلن می‌کرد.

مواسان به مدت چندین سال با کمک کورهٔ برقی خود یک ردیف کارهای جالب انجام داد که به وی امکان داد تا تشکیل شمار زیادی از کربورهای فلزی را بررسی کند و بویژه توانست در سال ۱۸۹۴ شرایط تشکیل کاربید کلسیم و خواص آن را مشخص سازد. اما کارهای وی تنها به بررسیهای آزمایشگاهی محدود می‌شدند و کسی که تولید صنعتی استیلن را پایه گذارد او نبود. این شخص آقای ل. بولیه[4] دستیار وی بود که در فوریهٔ سال ۱۸۹۴ امتیاز ساخت کاربید کلسیم در کورهٔ برقی و نیز استفاده از آن برای تولید استیلن را به نام خود به ثبت رسانید.

پیش از وی نتایج کم‌وبیش روشنی به‌دست آمده بود. در سال ۱۸۸۰ آقای بورشرس[5] شیمیدان آلمانی توانسته بود در کورهٔ برقی کاربید کلسیم بسیار ناخالصی به‌دست آورد؛ باز در آلمان در سال ۱۸۹۱ امتیازی در این مورد به نام بوم[6] به ثبت رسید. سرانجام چنین می‌نماید که آقای ت. ل. ویلسن متالورژیست امریکایی در سال ۱۸۹۱ نیز، بدون استفاده از روش بالا به تولید کاربید کلسیم دست یافت. مشاجرهٔ قلمی کوتاهی دربارهٔ پیشگامی، بین او و آقای بولیه، پس از انتشار امتیازهای اولیه بولیه درگرفت. بدین‌ترتیب، این موضوع یک مسألهٔ روز شد. خواص استیلن نیز

1. Maquenne 2. E.Davy 3. Travers 4. L.Bullier 5. Borchers 6. Böhm



شکل ۲۳.کوره برقی بولیه، برای ساختن کربور کلسیم.

کاملاً مشخص شدند. به‌طوری‌که این صنعت بسرعت راه افتاد. هرجا که انرژی برق در دسترس بود این کوره برپا شد.

آقای بولیه این امتیاز را داشت که کورهٔ مناسب تولید صنعتی این ماده را توصیف، و نسبت مخلوط مورد عمل را نیز تعیین کرد: آهک زنده ۵۶ قسمت و کربن ۳۶ قسمت. با تکیه بر همین پیشگامی است که وی به آقای ویلسن که به ثبت امتیاز خود در اوت ۱۸۹۲ تکیه می‌کرد، اعتراض کرده است. نخستین کورهٔ بولیه از تکنیکهای کوره‌های برقی مربوط به الکترومتالورژی الهام گرفته بود (شکل ۲۳). این کوره، شکل مکعبی داشت، آند عمودی آن را برای شروع کار کوره، پایین می‌آوردند و بتدریج که کار پیش می‌رفت بالا برده می‌شد. کاربید مذاب در انتهای آن جمع می‌شد. کاتد، همانا کف فلزی دیگ بود که درحال نوسان حول لولاهایش باز می‌شد تا کاربید در قالبی که روی چرخی قرار داشت، بریزد. هر دو کوره، موازی یکدیگر کار می‌کردند. آقای بولیه که شرکت کربورهای فلزی[1] پشتیبان وی بود برای ساختن انواع دیگری از کوره‌های دارای سوراخ بارگیری اندیشید. کورهٔ نخست آقای ویلسن، یک بوتهٔ سوراخدار بود. آند عمودی آن‌هم پایین و بالا می‌رفت. بزودی، پس ازگذشت پنج یا شش سال، کوره‌های بسیار گوناگونی، که پیوسته یا گسسته کار می‌کردند، برای این تولید انطباق داده شدند. این کوره‌ها اصولاً برای تولید صنعتی آلومینیم ساخته می‌شدند، مثل

1. Société des Carbures Métalliques

کوره‌های ارو و کورهٔ زیمنس و هالسکه و غیره.

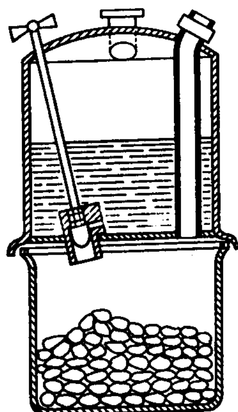
استیلن: استیلن که پس از بررسیهای برتلو در سالهای ۱۸۵۲ ـ ۱۸۶۳ بخوبی شناخته شده، و تا آن زمان یک ترکیب آزمایشگاهی مانده بود، در پرتو گرمای برق بسرعت به یک فراوردهٔ صنعتی تبدیل شد. با داشتن کاربید کلسیم، در واقع وسیلهٔ ساخت آسان آن در هرجا با وسیله‌ای نسبتاً ساده وجود داشت و از میان همه کربیدهای فلزی، کاربید کلسیم نخستین کربیدی بود که تولید آن در مقیاس صنعتی شد. قدرت روشن‌سازی آن را آقای برتلو تأکید کرده است. برای اثر دادن آب روی این کربید، دستگاههای متعددی ساخته شدند و در همان حال کوره‌های گوناگونی جهت تهیه کربید آن. تنظیم مقدار آن برای پرهیز از تولید زیاد، که خطر ترکش وسیله در اثر بالا رفتن فشار را داشت یک مسأله بود. این دستگاهها نخست به‌عنوان واحدهای بسیار بزرگ مجهز به یک کنتورگاز برای تغذیهٔ یک دستگاه ثابت یا قابل حمل طرحریزی شدند. شرکتهای راه‌آهن بزودی برای روشن کردن واگنهای مسافران، بدان علاقه‌مند شدند. آنها یا از چراغهای روغن‌سوز مندابی یا نفتی یا از چراغهای گاز شهر استفاده می‌کردند که بیشترین نور را برای واگنهای درجهٔ اول می‌داد. بررسیها و محاسبات گوناگون نشان دادند که با پایین آمدن بهای تولیدی کاربید، چیزی که بیش از دو یا سه سال فرصت نمی‌خواست، هزینه چراغهای استیلنی کاهش خواهد یافت.

اما دشواری بزرگی که وجود داشت، خطر ترکیدن دستگاه بود که استیلن یا مشتقات آن، در برخورد با موادی که تماس همیشگی با آن دارند، مثلاً مس، ایجاد می‌کردند. برتلو از خصلت گرماگیری واکنش تشکیل استیلن آگاه بود. او خواص تجزیهٔ انفجارآمیز آن و نیز خواص استیلید مس را بررسی کرده بود. عملیترین راه تهیهٔ این گاز برای کاربرد آن، این بود که آن را تحت فشار در لوله‌های فولادی که بخوبی ساخته شده‌اند وارد کنند. صنعت گاز قابل حمل، گازهای زغال‌سنگ، شیست یا روغن هنوز بکلی از بین نرفته بودند. استفاده از استیلن به‌جای آنها، بسیار اغواکننده بود.

گفت‌وگوهای بسیار تندی دربارهٔ خطرات این طرز خریدوفروش استیلن درگرفت. هواداران استیلن متراکم، حتی مایع شده، برای اثبات اینکه خطرات مورد بحث اهمیت چندانی ندارند لجاجت می‌ورزیدند. حوادثی که ایجاد شده بودند از نظر آنها مربوط به بدی دستکاری، بدی جنس یا ناخالصی استیلن بودند.

خوشبختانه آقایان ژرژ کلود و ا. هس[1] در اوج این گفت‌وگوها پیشنهاد کردند که از حلالیت زیاد استیلن در استون، برای کم کردن حجم آن، استفاده شود. آنان در فشار ۱۲ اتمسفر مقدار ۳۰۰ لیتر استیلن را در یک لیتر استون حل کردند. با اینکه روشی اغواکننده بود تا سال ۱۹۰۰

1. A.Hess



شکل ۲۴.چراغ دستی استیلنی.
سمت چپ، میله‌ای جریان آب را روی کاربید تنظیم می‌کند. در نوک لولهٔ سمت راست، چراغ روشن می‌شود.

از پذیرفتن آن خودداری شد. با اینکه پر کردن تحت فشار گازها در سیلندر، کاملاً آزاد بود، امتیاز این روش به ثبت رسید. آقایان برتلو و وییی[1] در سال ۱۸۹۷ نشان دادند که استیلن محلول در اثر فشار، که کلودوهس آن را به‌کار برده بودند، هنوز می‌توانست منفجر شود. شرکت استیلن محلول که از امتیاز دو نفر بالا استفاده می‌کرد عیب اخیر را هم با ایجاد آستری از آجرهای پوک برای سیلندرها و جذب شدن استیلن در آنها، برطرف کرد.

روشن‌سازی با استیلن با سرعت فراوان رواج گرفت و تا پایان دوره بین دو جنگ، یعنی تا زمانی‌که برق عملاً همهٔ دفاتر کار و محلهای سکونت را روشن ساخت به‌کار گرفته می‌شد. نخستین نمونه‌های چراغهای قابل حمل که بی‌دلیل مشکل ساخته می‌شدند جای خود را به دستگاههای زمخت با شارژ و کار ساده واگذاردند که هر شخص ساده، اعم از کارگر کارگاهها، شخص غیربومی و روستایی با اطمینان کامل می‌توانست از آنها استفاده کند (شکل ۲۴). این دستگاه شامل همهٔ مشخصات چراغ نفتی برای استفادهٔ یک نفر بود درحالی‌که مزیت قابل حمل بودن و نگاهداری آسان کاربید و قدرت بسیار زیاد روشنایی را هم داشت. کاربید کلسیم از دههٔ نخست سده بیستم در دکانها هم به فروش می‌رفت.

کارهای طولانی آقای برتلو، چهل سال بعد به استیلن هویتی اعطا کرد و توانستند از آن، یک رشته تمام و عملاً بی‌پایان ترکیبات کربنی به‌دست آورند. نخستین ترکیبات این رشته، که لااقل در

1. Vieille

آزمایشگاه‌ها به‌دست آمده‌اند، اجسام سرشناسی هستند که بعضی از آنها در صنعت هم کاربرد دارند، از قبیل الکل یا بنزن، یا ترکیبات متعددی دیگری که ارزش آنها بیشتر سمبولیک است تا اقتصادی، مانند: متان، اتان و غیره. آقای برتلو افسانهٔ فلسفی مربوط به نیروی حیاتی را درهم شکست. با دسترسی آزاد به کاربید کلسیم، تکنسین‌ها به امکان آزاد شدن خود ازکمبودهای مادی، برای توسعهٔ میدان فراورده‌های خود، با واژگون‌سازی همهٔ روشهای کلاسیک یا سنتی امیدوار شدند. چنین آینده‌ای را تقریباً همهٔ کسانی‌که در سالهای ۱۸۹۵ ـ ۱۹۰۰ با استیلن کار می‌کردند نوید داده‌اند؛ اما باید پنجاه سال انتظار کشید تا این رؤیا جامهٔ حقیقت پوشد.

پس از اندک مدتی، روشن‌سازی وظیفهٔ اصلی و صنعتی استیلن شد. آزمایشهایی برای کربن خورانی گاز زغال‌سنگ و کاربرد استیلن در موتورهای درونسوز انجام گرفت. اما واکنش انفجاری، بسیار خردکننده بود.

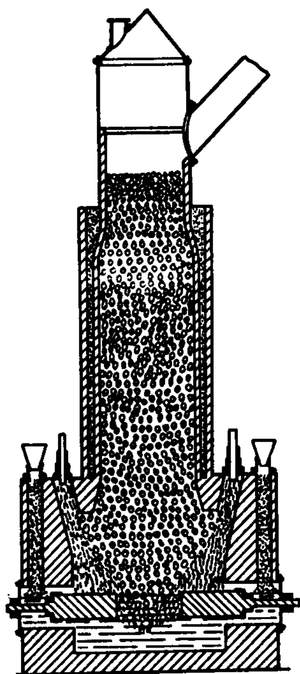
در ۱۸۹۶ آقای هانری لوشاتلیه نشان داد که با سوخت مخلوطی با حجمهای برابر از استیلن و اکسیژن، دمایی در ردیف ۴۰۰۰ درجهٔ ایجاد می‌شود که از دمای مشعل هیدروژنی (اکسیدریک)، ۱۰۰۰ درجه بیشتر است. این کاربرد با اینکه بسیار ساده می‌نمود در استفاده از آن شتاب نشد. مشعلهای گاز شهری و گاز هیدروژن رواج بسیار داشتند. جوشکاری با برق و آلومینوترمی (ترمیت) بتازگی رسم شده بود. مشعل اکسی استیلنی در واقع حدود ده سال به‌کارگرفته شد.

فراورده‌های جدید کورهٔ برقی: گرم کردن با برق جز این برخورد بسیار مهم از لحاظ جهتگیری آتی صنایع شیمیایی، در آغاز، تنها در ساخت چند نوع فراورده دارای اهمیت متوسط مربوط به تولید فسفر و سولفورکربن کمک کرد؛ فراورده‌هایی که در آن روزگار با روشهای گرم کردن کلاسیک هم به‌دست می‌آمدند، و نیز ساخت یک ترکیب تازه، به نام کربید سیلیسیم، که آقای شوتسنبرگر[1] آن را خالص به‌دست آورد و برای نخستین بار به‌طورکامل در سال ۱۸۹۲ مورد مطالعه قرار داد، و پس از وی، آقای مواسان در ۱۸۹۳ همین اقدام را به‌عمل آورد.

کورهٔ ویژهٔ تهیهٔ فسفر سفید را آقای ریدمان[2] در ۱۸۸۸ تامس پارکر در ۱۸۸۹ براساس مدل کورهٔ کولز[3] ساختند و از ۱۸۸۶ در متالورژی از آن استفاده شد. این کوره احیای اسید فسفریکی که سیلیس آن را جابه‌جا کرده بود بوسیله زغال ممکن می‌ساخت.

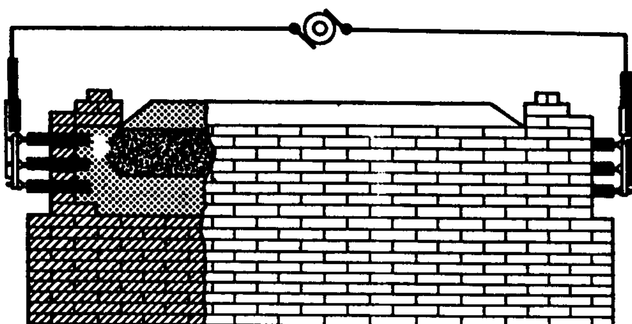
کاربرد گرمای برقی برای بخار کردن گوگرد این عیب را داشت که ممکن بود با کک موجود در ستون بزرگ عمودی ترکیب شود و الکترودهای زغالی را بشکنند. اما در عوض، دارای مزیت گرم شدن آسان بود که باتریهای بزرگ کوره‌های کلاسیک فاقد آن بودند. آقای ر. ی. تیلور که یک

1. Schützenberger 2. Readmann 3. Cowles



شکل ۲۵.کورهٔ برقی ر. ی. تیلور، برای تهیهٔ سولفورکربن.
قسمت هاشورزده از گل نسوز است که با ورق آهن از بیرون پوشیده شده است. استوانهٔ مرکزی با کک پر شده است، بخارهای گوگرد از میان ککها می‌گذرند. سولفورکربن از بالا، از سمت راست خارج می‌شود. در پایین، چهار الکترود زغالی افقی کارگذاشته شده‌اند، که دو عدد آنها دیده می‌شوند، کوره را گرم می‌کنند. از گلوییهای لوله‌ای، زغال حبه‌ای وارد می‌شود تا الکترودها حمایت شوند. از دو قیف مخروطی، گوگرد را وارد کوره می‌کنند.

صنعتگر امریکایی بود، در سال ۱۹۰۱ راه‌حل بسیار جالبی برای رفع این اشکال یافت (شکل ۲۵). کار گرم کردن کوره بوسیلهٔ چهار الکترود که در یک ظرف استوانه‌ای قرار داشتند انجام می‌گرفت؛ ذوب شدن و تبخیر گوگرد در همین استوانه عملی می‌شد. برای جبران سایش، مقداری حبه‌های زغال هادی از سوراخی که در ظرف ایجاد شده بود وارد می‌کردند. این زغال در نقش مقاومت برقی برای گرم شدن هم عمل می‌کند. گوگرد را از راه استوانه‌های متحدالمرکز در بارگیر و در ستون وارد می‌کنند و بدین‌ترتیب، از اتلاف گرمای کوره پرهیز می‌شود. در زمانی‌که مصرف کربید گوگرد رو



شکل ۲۶.کورهٔ برقی آچیسن برای ساختن کربوراندم.

به افزایش داشت این روش، نوعی اصلاح مفید بود و ساخت آن نمونه‌ای از کاربرد ماهرانهٔ کورهٔ برقی به‌شمار می‌آمد.

ساخت کربید سیلیسیم در همان مرحلهٔ نخست تحقیقات روی ترکیبات سیلیسیم با فلزات، بوسیلهٔ کورهٔ برقی عملی شد. بیشتر این کارها، مرحلهٔ آزمایشگاهی نداشتند. در سال ۱۸۹۲ تولید صنعتی کربید سیلیسیم در کارخانه‌های نیاگارا فالز شروع شد. قدرت سایندگی آن از سنباده آهن و جواهر بیشتر و هزینهٔ تولید آن نیز که نسبتاً کم بود موفقیت بازرگانی آن را تضمین می‌کردند. این فراورده بی‌درنگ با نام کربوراندم به فروش رسید که نتیجهٔ ترکیب دو واژهٔ کربن و (کورندون) بود. آقای ا. گ. آچیسن[۱] که مبتکر این فراورده بود نخست از وسیلهٔ بسیار ساده‌ای استفاده کرد: دیگی آهنی که داخل آن پوششی از کربن هادی داشت و با مخلوطی از رس و کک آن را پر می‌کرد و الکترودی از زغال در آن غوطه‌ور بود. کربوراندم را به شکل بلورهای آبی و درخشانی که دور الکترود عمودی جمع شده بودند به‌دست می‌آورد. آچیسن بعدها یک کورهٔ با مصالح بنایی طرح کرد که بسیار صاف و طویل بود، مقطعی چهارگوش داشت. الکترودها روی هریک از اضلاع کوچک نصب شده بودند (شکل ۲۶). او در محور این کوره یک هستهٔ گرافیتی قرار داده بود تا برق جریان داشته باشد. آچیسن، در آغاز می‌پنداشت که کربوراندم یک کربید آلومینیم است. وی در تلاش برای بهتر کردن خصوصیات آن متوجه شد که اگر به‌جای آلومینیم از سیلیس، یعنی ماسه استفاده کند بهتر است، و به مخلوط خود نمک دریا افزود تا جریان برق آسانتر شود و نیز مقداری خاک اره برای اینکه جرم، متخلخل بماند تا گازهای تشکیل شده (CO) فرار کنند. به‌دنبال این کارهای

۱. Acheson ادوارد گودریچ ۱۹۳۱ ـ ۱۸۵۶ مخترع امریکایی

بر آن شد تا منظماً در حدود ۱۰۰۰ تن در سال در حوالی ۱۹۰۰ به تولید کربوراندم بپردازد. در این دوره صنعت کربوراندم در اروپا ایجاد شده بود و در فرانسه، آلمان و اتریش، تولید آن هنوز کم بود. از این فراورده بی‌درنگ برای پرداخت فلزات و کار روی الماس و شیشه، و تیز کردن ابزارها استفاده شد. چند سال بعد آن را به‌جای فروسیلیسیم برای ساختن ابزار تراشکاری به‌کار بردند.

پیش از اینکه سده پایان یابد روش گرم‌سازی با برق برای پخت شیشه به‌کار گرفته شد. نخستین ثبت این امتیاز در سال ۱۸۸۱ در آلمان انجام گرفت اما روش آن که عبارت بود از ریختن گرد مخلوط روی پارچه‌ای از پلاتین که با برق گرم می‌شد، در مقیاس صنعتی نبود. باید گفت که باز در آلمان بود که نخستین کوره‌های قوسی را طرح کردند که نتایج آن خیلی رضایتبخش نبود. به‌کارگیری شمعهای یابلوچکوف به‌جای الکترودهای معمولی حدود سال ۱۹۰۰، نیز تکنسین‌ها را مأیوس کرد. همهٔ کوششها، کُند، دشوار و یأس‌آور بودند. نتایج اولیه‌ای که در ۱۹۰۴ به‌دست آمد به ذوب سیلیس مربوط می‌شد که بعدها در ساخت پوششهای مقاوم در برابر مواد شیمیایی برای ظرفهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، رویهمرفته شاخه‌های متعددی از صنایع شیمیایی کم‌کم، و با کمی تأخیر از صنعت متالورژی، از گرم کردن با برق استفاده کردند. اما از سال ۱۸۹۲ در برق، وسیلهٔ کار جالبی برای ایجاد روشهای تازهٔ تولید یافته بودند.

صنعت کوچک معدن

طی پنجاه یا شصت سال، تحول و تنوع روشهای گرم کردن در صنایع شیمی با روشهای سنتی میراث سده‌های پیش، به شکل واقعی بریدند و امکان بهترکردن مصالحی که تا آن زمان به‌کار گرفته نمی‌شدند، و نیز تکثیر شاخه‌های تولیدی و تهیهٔ فراورده‌های جدید بی‌شمار برای صنایع دیگر فراهم آمد. این اجسام از پایان سدهٔ هجدهم شناخته، یا اینکه در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم، همچون عناصر ید و برم کشف شده بودند. این دو هالوژن به‌عنوان مثال بسرعت وارد فراورده‌های صنعتی شدند که در داروسازی برای نخستین‌بار، با یافتن کاربرد زیاد برای تهیهٔ صفحات حساس عکاسی، در مراحل ساخت مواد رنگی آلی و ترکیبات صنعتی بسیار گوناگون به‌کار گرفته شدند. مواد معدنی دیگری، بیشتر از نمکها یا اکسیدهایی که صرفاً فراورده‌های آزمایشگاهی بودند عوامل توسعهٔ فراورده‌هایی شدند که نتیجهٔ پیشرفتهای صنایع دیگر بودند. گاهی به این اجسام تنها در اندازه‌های بسیار کم نیاز بود، در جنب تنها اسید و ترکیبات قلیایی؛ اما بعضی از آنها برای تغییر شکل زندگی میلیونها نفر کافی بودند.

کاربرد خاکهای کمیاب: یکی از نمونه‌های بسیار جالب از این لحاظ، کاربرد اکسید توریم برای افزایش قدرت روشن‌سازی توری چراغهای گازی است که در سال ۱۸۸۵ آقای آوئرفون ولسباخ آنها را اختراع کرد و چندین سال برای تکمیل آن کوشید. آقای آوئر، نخست از نیترات لانتان و زیرکونیم یا ایتریم استفاده کرد. ترکیب خاکهای کمیاب را در سال ۱۷۹۴ آقای گادولین[1] کشف کرده بود و بیست سال بعد آقای برزلیوس. بیشتر آنها را توانستند از راه دشوار تبلور جزءبه‌جزء به حالت خالص به‌دست آورند. زمینهٔ این توریها، نسجی آغشته به محلولهای نمک بود که شکل لوله به آن داده بودند و برای اینکه جز یک اسکلت معدنی متشکل از اکسیدهای فلزی باقی نماند آن را تکلیس می‌کردند. به‌جای این اکسیدها چند سال بعد، اکسید توریم را به‌کار گرفتند که از خاکهای موجود در برزیل و کارولینای شمالی، مونازیت استخراج می‌شد. این آمیزه‌ای از فسفات و تیتانات سریم، دیدین، لانتان و توریم بود که تنها ۵ تا ۶٪ اکسید عنصر اخیر در آنها یافت می‌شد. در سال ۱۸۹۵ بهای یک کیلوگرم نیترات توریم حدود ۲۵۰۰ فرانک تثبیت شده بود و دو سال بعد تا ۷۵ فرانک بهای آن پایین آمد.

سرعت دست یافتن به چنین کاهشی، نشانهٔ ظرفیتهای صنایع شیمی در حل مسائل دشوار آن زمان بود. استخراج اکسید توریم مستلزم یک رشته عملیات انحلال، تراسب، تکلیس، تصفیه و غیره بود که اقتصاد کلی آن نمی‌توانست در محدودهٔ، رضایتبخشی از نظر بازرگانی انجام گیرد مگر اینکه بپذیریم که در اواخر سدهٔ نوزدهم وسایل موجود، گوناگون و انعطاف‌پذیر بودند.

می‌بایست این نکته را در نظر داشت که در همین نیم سده، درکلیهٔ فراورده‌های شناخته شدهٔ سنتی یا نوآوری شده بوسیلهٔ تکنسین‌های آن زمان، نتایج مشابهی به‌دست آمده بود. طبیعی است که گوناگونی وسایل مطرح شدهٔ گرم کردن، تنها عامل این رونق نبود. آنان متوجه این نکته بودند که تحول این وسایل، تعیین‌کنندهٔ ساختار آن بخشی از صنعت است که نیازهای عملیاتی را تأمین می‌کند که پیش‌نیاز یک کار بنیادی در همهٔ رشته‌های شیمی است.

تحول این صنعت بزرگ

این رشته صنعتی در جریان تحول خود با گوناگونی کوره‌ها، دیگهای بخار، ستونهای تبخیر و غیره مشخص می‌شود. در سالهای ۱۸۴۰ ـ ۱۸۶۰ بیشتر خصلت پیشه‌وری خود را که در دهه‌های پیشین با وجود راه افتادن صنایع بزرگ شیمیایی، معدنی و غیرمعدنی هنوز حفظ شده بود از دست دادند. این صنعت، مرحلهٔ تولید در صورت تقاضا در خود مؤسسات شیمیایی را پشت سرگذارده

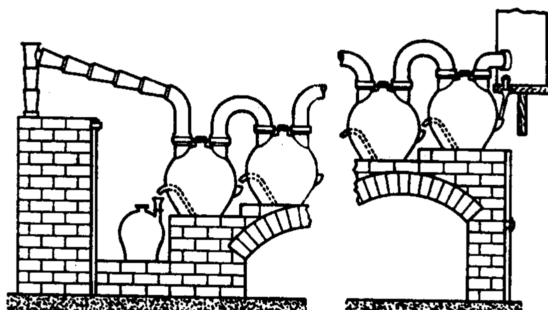
1. Gadolin

بود یا اینکه واسطه‌هایی با دستکاری وسایل دیگر، درپی انطباق دادن آنها با نیازهای شیمی‌دانها باشند. زمانی‌که مواد خام مورد نیاز و مایعات ظرف به ظرف شونده، فراورده‌های آماده برای تحویل و انتقال به وزنها و حجمهای چشمگیری رسیدند و دلالهای متخصص این کار پرورش یافتند، یک رشتهٔ ساخت مصالح صنعت شیمیایی بسرعت شکل گرفت. با آغاز دو دههٔ پایانی این سده، گسترش آن شتاب یافت. این صنعت ازکارشناسان صلاحیت‌داری برخوردار شد و از همهٔ منابع صنایع سفالگری و مصالح نسوز، متالورژی و مکانیک کمک گرفت. انگیزهٔ این پدیده، طبعاً ترقی صنعت بزرگ شیمی و گسترش صنایع کوچک آن بود. اما بدون آن‌هم، این پیشرفتها نمی‌توانستند ایجاد شوند. در اینجا ما با تکرار آن پدیده‌ای روبه‌رو می‌شویم که در حدود یک سدهٔ پیش به تولید انرژی بوسیلهٔ ماشین بخار، تحول سیدرورژی و مراحل نخستین کارهای مکانیکی مربوط می‌شود. نمونه‌های دیگر آن، بعدها تولید برق صنعتی و پس از آن، صنعتی شدن الکترونیک است.

سفالگری و سرامیک صنعتی: در رشتهٔ صنعت شیمی، وسایل ساخته شده باید از یک خطر بسیار ویژه ـ خوردگی موادی که از آنها ظرف، لوله یا وسایل نگاهداری می‌سازند ـ مصون باشند. این مواد، فراوان و اغلب ارزان بودند: رس سفالگری، چدن، سرب، اما در مواردی ناگزیر از به‌کارگرفتن پلاتین بودند که بهای بسیار گزافی داشت. اشکال کار این صنعت، ساخت شکلها و حجمهایی با اطمینان از آببندی و استحکام لازم بود.

همراه با صنایع اسیدها، سفالگری و سرامیک با کاربرد صنعتی، پیشرفت چشمگیری داشتند. آنها از همهٔ وسایل لازم، ازآن میان، مکنده‌ها، تلمبه‌ها و بادبزنها کمک گرفتند. علت موفقیت این بود که این تجهزات را توانستند برای استفاده از روشهای جدید اصلاح کنند و نیز ظرفیت آنها منظماً افزایش یابد.

ردیف قرابه‌ها با لوله‌های فرار بخار، حباب‌سازها و لوله‌های رابط با اشکال گوناگون و ترتیبات لازم مناسب هر کار طرحریزی شدند (شکل ۲۷). آنها را درکارگاههای اسیدنیتریک، اسید کلریدریک و کلر و برم قرار داده بودند. برای تهیهٔ این مواد، لااقل سه مادهٔ نخست، روشها تحول جزئی یافته بودند و بویژه از واکنشهای بنیادین جابه‌جا شدن بوسیلهٔ اسید سولفوریک، که ازگذشته‌ها، تنها روش عملی بود دورنشدند. بریدن از سنت تا سدهٔ بیستم، تا دوران بین دو جنگ جهانی و عمومیت یافتن الکترولیز و روشهای سنتزی انجام نگرفت. بنابراین، بخصوص مهارت درکارکردن با وسایل موجود، موجب کارایی بیشتر تجهیزات برای افزایش تولید می‌شد.

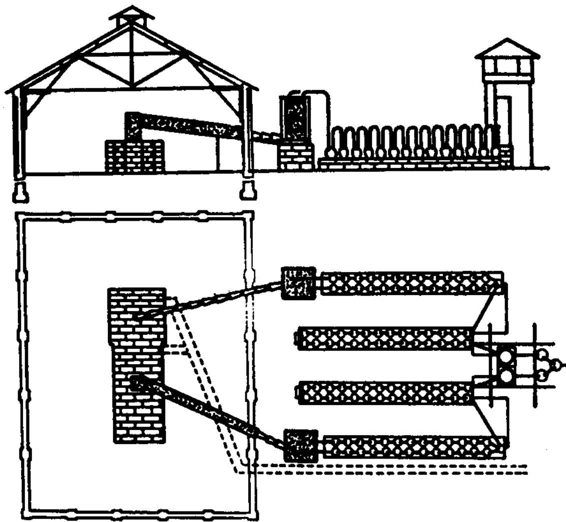


شکل ۲۷.باتری تغلیظ اسید نیتریک از سرامیک صنعتی.
سمت چپ، دیگ جابه‌جایی اسید نیتریک از نیترات بوسیلهٔ اسید سولفوریک. سمت راست، برج میعان پر از کک و سنگ چخماق که آب از بالا به پایین آن سرازیر است. بخارهایی که از دیگ خارج می‌شوند در قرابه‌ها از چپ به راست اسید را هم می‌زنند. سیفونهایی مایع را از راست به چپ جریان می‌دهند. اسید بازاری با غلظت ۳۶ درجهٔ بومه.

دشواریهای اسید نیتریک: واکنش اسید سولفوریک بر نمکها همیشه در دیگهای چدنی عمودی که در بنایی از مصالح ساختمانی، بالای آتشدان گذاشته می‌شد انجام می‌گرفت. گازهای سوختی در دودکشهای جریان داشتند. روشهای معمولی، اسید نیتریک نسبتاً رقیق ۳۵ تا ۳۶ درجهٔ بومه تهیه می‌کردند. تراکم بخارها و نیز تغلیظ احتمالی این اسید، مشکلات سختی پدید می‌آورد. مدتهای بس درازی کوشیدند تا با افزایش شمار قرابه‌های حباب‌ساز و با اتصال انتهای این ردیف قرابه‌ها به یک برج میعان، ساخته شده از سفال، پر از کک یا سنگ چخماق این مشکلات را برطرف سازند. ترکیب بخارهای نیترو، بسیار پیچیده و متغیر بود، کیفیت اسید بستگی به طرز کار دستگاه داشت.

آقای والانتینه[1] در سال ۱۸۹۲ پیشنهاد کرد که عملیات در یک خلاء جزئی حدود ۱۱۰ میلیمتری که با یک دَم آبی ایجاد می‌شود انجام گیرد. نیترات خشک شده و اسید سولفوریک ۶۶ درجهٔ بومه را به کار گرفتند. طرح والانتینه بسرعت تکمیل و وسیعاً مورد استفاده قرار گرفت. در همان دوران روشهای دیگری را آقایان گوتمان[2]، دیترله[3] و رورمان[4] برای تهیهٔ اسید نیتریکی که بدون ناخالصیهای معمولی، بویژه اسیدهای هالوژنی ناشی از ناخالصیهای نیترات باشد مطرح کردند. این روشها شامل گذرانیدن بخارهای نیترو از ردیف پیچیده‌ای از لوله‌های عمودی یا مایل یا از مارپیچی از خاک رس بود که اتصالات متعددی با یکدیگر دارند و دمیدن جریان هوا در همهٔ دستگاه. بعدها،

1. Valentiner 2. Guttmann 3. Dieterle 4. Rohrmann



شکل ۲۸.تجهیزات سرامیکی برای ساخت اسید کلریدریک.
برشهای عمودی و افقی، سمت چپ، کورهٔ سولفات ($NaCl + SO_4H_2$) با دیگ (در بالا روی برش افقی دیده می‌شود) و قشر آهکی. هر باتری شامل: یک برج شست‌وشو، ۵۰ قرابهٔ ۳۰۰ لیتری و یک قرابهٔ ۵۰۰ لیتری، و یک برج میعان است.

در جنگ جهانی اول در جهت مقاصد نظامی، تجهیزات تغلیظ را به‌جای خاک‌رس یا سرامیک از کوارتز ساختند.

ارزشیابی اسیدکلریدریک جذب بخارهای اسید کلریدریک، باز در ردیفهایی از قرابه‌ها، مشابه قرابه‌های اسید نیتریک عملی می‌شد. اما در این‌باره هم ترتیبات پیچیده‌ای نظیر وسیلهٔ سلاریوس[1] در سال ۱۸۹۹ طرح شد که گویا زیاد رواج نیافت اما ضمناً گویای مهارت سازندگان سفالگران صنعتی بود (شکل ۲۸). اسید کلریدریک در آغاز، چنانکه دیدیم، یک فراورده جانبی مزاحم در ساخت سود لوبلان بود.

در این‌جا به صنعتِ سود باز نمی‌گردیم. تنها به‌خاطر می‌آوریم که پیوسته در تحول بوده است؛ نه‌تنها از جنبهٔ اصول اساسی تهیهٔ کربنات سدیم ـ گذر از روش لوبلان بروش سلوی ـ بلکه همچنین از نظر گوناگونی فراورده‌هایی که از آن ساخته و وارد بازار می‌شدند. نامهای فراورده‌های بازاری، که با روشی کاملاً تجربی ساخته شده بودند در زبان صنعتی و بازاری هنوز هم باقی مانده‌اند.

1. Cellarius

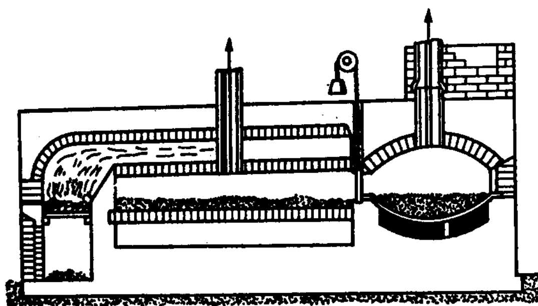
هرچند که این فرهنگ بقدر کافی از یاد رفته می‌نماید، هر اصطلاح دلالت، اگر هم نه به‌طور پیوسته، لااقل بر زمان معینی می‌کند و برفراورده‌های کاملاً آشنای مورد نظر اشاره دارد. در آغاز تنها مخلوطهای کربناتی جامد یا مایع مورد نظر بودند، سوزان یا ناسوزان. اما پس از ۱۸۵۰ بود که ساخت سودسوزان برپایهٔ روش آقای ویلیام گوسیج شروع شد. هیچ چیز پیچیدگی شبکهٔ تولیدها را دربارهٔ سود لوبلان و مواد سفیدکننده بهتر از کتاب ژرژ لونژ نشان نمی‌دهد. این کتاب در پایان سالهای ۱۸۷۰ در سه زبان با عنوان: *Traité théorique et pratique de la fabrication de la soude et de ses branches collatérales* به چاپ رسید که هر سه مجلد آن سراسر به‌رشتهٔ صنعتی شیمی معدنی سنگین مربوط می‌شد.

آقای گوسیج در سال ۱۸۳۶ امتیاز انحلال اسید کلریدریک فراری از کوره‌های تولید سود لوبلان را که منظور اصلی آن ساخت سولفات سدیم برای تبدیل آن به کربنات سدیم بوسیلهٔ زغال و کربنات کلسیم بود به ثبت رسانید. اما می‌بایست سی سال بگذرد تا روش میعان در سایهٔ تجهیزات سنگین سفالگری و سرامیک‌سازی عملی شود.

اسید کلریدریک در پایان سده به یک فراوردهٔ صنعتی پرمصرف تبدیل شده بود، آن‌هم در دورانی که تولید سود بروش لوبلان در برابر روش سلوی واپس می‌نشست. استفاده از کوره‌های بازتابی که روی کف آن قشر آهکی متحمل پخت دوم می‌شد و سولفات اسید، تبدیل به سولفات خنثی، و پخت نخست در دیگی چدنی یا سربی انجام می‌گرفت که گازها از ته دودکش از روی آن می‌گذشتند ادامه داشت (شکل ۲۹). از کورهٔ موفلی دارای دیگ نیز در همان زمان استفاده می‌شد. کورهٔ اخیر نیز مانند کوره‌های پیشین، همزنی و مواظبت از تودهٔ گرم را لازم داشت ـ کاری که با دست کارگران انجام می‌گرفت. باز می‌توان گفت که در سالهای ۱۸۸۰ ـ ۱۸۹۰ نخست در انگلستان و آلمان شمار زیادی کوره‌های گردان وارد میدان شدند. نوع بسیار رایج این کوره‌ها، طرح آقای مک ایر[1] بود (شکل ۳۰). این کوره یک کف چدنی گردان داشت که چند همزن عمودی به شکل چنگال، که حول محور عمودی خود نوسان داشتند بالای آن کف معلق بودند. این کف، قشر آهکی را جابه‌جا می‌کرد. مخلوط نمکهایی که در ظرفی در بالا پخت نخست را تحمل کرده بودند روی این کف، ریخته می‌شدند؛ اسید سولفوریک و نمک دریا نیز پیوسته وارد آن می‌شد. اطاقک باز تابنده‌ای که از مصالح ساختمانی بود آتشدان و کف کوره را در خود می‌گرفت.

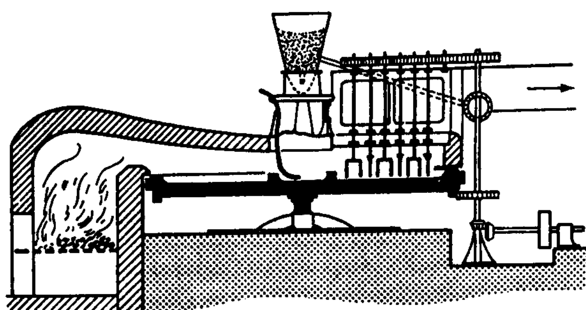
آقایان هارگریوز و رابینسون در سال ۱۸۷۲ اندیشیدند که گاز سولفورو، اکسیژن و بخار آب را مستقیماً روی نمک دریا اثر دهند. آنان در این روش از طرحی مشابه طرح آقای سلوی برای ساخت

1. Mackear



شکل ۲۹.کورهٔ بازتابی برای ساخت اسید کلریدریک.
پخت اول در ظرف سمت راست انجام می‌گیرد. فراوردهٔ حاصل از سوراخی روی قشر آهک ریخته می‌شود تا پخت دوم سولفات اسید انجام شود.

کربنات دو سود الهام گرفته بودند (رجوع کنید به مجلد سوم، صفحهٔ ۷۹۷). اساس کار، اثر دادن بخارها روی فراورده‌ای جامد یا مایع (در مورد روش سلوی) بود. واکنش هارگریوز در یک ردیف یا ده‌تایی ستون چدنی انجام می‌گرفت که در یک بلوک از مصالح ساختمانی قرار داشتند. این ستونها دارای آستری از آجرهای کلرورسدیم بودند و گاز سولفورویی که از کوره‌های پیریت می‌آمد از آنها می‌گذشت. تجهیزات مربوط به میعان هیچ تغییری نکردند.



شکل ۳۰.کوره بازتابی با کف گردان، ساخت مک ایر.
سمت چپ، آتشدان کورهٔ بازتابی. سمت راست، مکانیسم حرکت کف گردان و همزنهای مکانیکی. اسید سولفوریک از یک لولهٔ سربی به مرکز کف کوره می‌ریزد. در اینجا نمک دریا از قیف مجهز به پخش مکانیکی روی آن ریخته می‌شود. اسید کلریدریک از لولهٔ بالا، سمت راست خارج می‌شود.

کلر ارزان: کاربرد اصلی اسید کلریدریک، تهیهٔ کلر بود که تا آن زمان برپایهٔ واکنش کلاسیک شله انجام می‌شد: اکسایش بوسیلهٔ دیوکسید منگنز. این واکنش در ظرفهای سنگی دارای زبانهٔ سربی برای خارج شدن کلر و مقداری ماسه سنگ برای ورود بخار آب به‌عنوان گرم‌کنندهٔ انجام می‌گرفت. زمانی‌که با روشی غیر از لوبلان، اسید کلریدریک را وارد عمل نمی‌کردند و واکنش اصیلی را به‌کار می‌گرفتند، نمک دریا، دیوکسید منگنز، اسید سولفوریک، عملیات را در دیگهای چدنی انجام می‌دادند. جذب اسید آزاد شده مستلزم ظرفهای بزرگ خاک‌رسی بود. مسألهٔ اساسی برای اقتصادی بودن این فرآیند، در هر دو حالت، باز همان بازیابی دیوکسید منگنز از سولفات تشکیل شده، بود. آقای ولدن در سال ۱۸۶۸ راه‌حلی پیشنهاد کرد که برپایهٔ عمل آوردن باقیماندهٔ با کربنات کلسیم بود تا بدین‌ترتیب، اسیدسولفوریک و ناخالصیهای دیگر حذف شوند، سپس آهک کشته می‌زنند و هوا را از روی آن عبور می‌دهند. طرز کار را خود آقای ولدن پس از بررسی شیمیدانهای متعدد، از جمله آقای لونژ، تکمیل کرد تا نوع و ترکیب مخلوطهای مختلف را که در هر مرحله با آنها برخورد می‌شود تعیین کند. ولدن بویژه به‌جای آهک، منیزی را به‌کار برد. در واقع وی با وجود اطلاعات به‌دست آمده، همیشه با روشهای نیمه تجربی کار می‌کرد و موفقیت او مرهون مهارت کارگرانش بود. بعدها نام روش ولدن به مجموعه کارهایی داده شد که از اسید کلریدریک و دیوکسید منگنز آغاز می‌شود و تا بازیابی این دیوکسید پیش می‌رود.

طبیعی است که برای حذف دخالت دیوکسید منگنز، یعنی ماده‌ای که نسبت به مواد دیگری که وارد واکنش می‌شوند، گران است، بکوشند. خواهرزادهٔ آقای تنانت درکارخانه‌ای درگلاسگو به‌جای دیوکسید از نیترات سدیم استفاده کرد. همچنین لازم بود که ستونهای واکنش دو آجری به‌کار گرفته شوند. این اصل با چند اصلاحی که در آن وارد شد در آلمان مدتها رواج داشت. کمی بعد، حدود سال ۱۸۷۰ آقایان دیکن[1] و هورتر[2] اسید کلریدریک را بوسیلهٔ جریانی از اکسیژن هوا، مستقیماً تجزیه کردند. آنها متوجه شدند که این واکنش می‌تواند در دمایی نسبتاً پایین، بین ۳۷۰ تا ۴۰۰ درجه در مجاورت نمکهای معدنی نظیر سولفات مس عملی شود. آقای هازن کلور[3] برای مؤسسه آلمانی رنانیا و شرکت پچینی در ۱۸۸۳ تجهیزات ویژه‌ای برای تولید اسید کلریدریک جهت تجزیهٔ آن به کلر به کمک روش بالا طرحریزی کرد. در این قضیه نیز سلسلهٔ واکنشها تا مدتها مبهم و تاریک ماند.

تنها ده سال بعد بود که این فرآیند رفته‌رفته شناخته شد. اکسید مس با تغییر شکل خود نخست به کلرورکویورو و بعد کلرورکویوریک به‌عنوان یک عامل کاتالیزور عمل می‌کند. در مرحلهٔ دیگری

1. Deacon 2. Hurter 3. Hasenclever

نیمی از کلر خود را رها می‌کند و به کلرورکویورو احیا می‌شود و این ترکیب نیز تحت تأثیر جریان هوا، به اکسید مس تبدیل می‌گردد. همین تغییر شکلها نیز در مجاورت سولفات مس انجام می‌گیرند، که پایهٔ روش دیکن است.

همهٔ این روشها با اصلاحات کم و زیادی که طی زمان متحمل شدند ـ نوشتارهای سالهای ۱۸۸۰ تا ۱۹۱۴ شیمی، فهرست شگفت‌انگیزی از انواع آنها به‌دست می‌دهند ـ مراحل پایانی تولید شیمیایی اسید کلریدریک و کلر را روشن می‌کنند، مثل مجموعهٔ کارهای مربوط به اسید نیتریک. عوامل تازه می‌بایست بتدریج اهمیت آن را در گذر دومین و بویژه سومین دههٔ سدهٔ بیستم کاهش داده باشند. الکترولیز سبب شد که صنایع شیمیایی از مهارتهای دستی و تجهیزات پیچیده و کارهای غالباً دقیقی مثلاً در ساخت، تقطیر جزءبه‌جزء بخارهای اسید کلریدریک و آب که در یکدیگر محلول هستند آزاد شوند. اکسایش کاتالیزوری آمونیاک دومین عامل تغییر شکل بنیادی این صنعت سازندهٔ اسیدهای ردیف نخست ساختارهای کلاسیکی صنعت سنگین شیمی بود ـ ساختارهایی که روش مجاورتی تولید اسیدسولفوریک، در آنها شکافهایی وارد آورد.

اسید سولفوریک به روش مجاورتی: تا سال ۱۸۷۰ اسید سولفوریک بی‌آب تنها به شکل سنتی ساخته می‌شد، که روش تخریب خشک در قرعهای سنگی و یتریولی، که معمولاً با شست‌وشوی شیستهای پیریتی به‌دست می‌آمد، نمایندهٔ آن بود. این اسید که طبق عادت اسید نوردهاوزن نامیده می‌شد و مرکز تهیهٔ آن ساکسونی بود در اواسط سدهٔ نوزدهم تقریباً فقط بوسیلهٔ استارک[1] در بوهمیا، نزدیک پراگ تولید می‌شد. این کورهٔ سنتی تونلی بود که برای این کار مورد استفاده قرار می‌گرفت. در ۱۸۷۲ تنها مقدار ۱۷۲۰ تن اسید سولفوریک در این کوره‌ها ساخته شد. بهای این اسید دودکننده، بسیار بالا بود.

ساخت اسید نوردهاوزن تنها در نزدیکی رگه‌های شیستی و یتریولی دارای ترکیب مناسب عملی بود. آقای کلمنز وینکلر[2]، در تلاش برای رهایی از این قید، نخست درصدد برآمد که با فعل و انفعال اسیدسولفوریک روی باقیماندهٔ تشویهٔ پیریتها، نوعی مات و تیریولی، به‌طور مصنوعی تهیه کند. تخریب خشک این مات می‌توانست انیدرید سولفوریک تهیه کند تا اسید اطاقهای سربی غنی شوند. لیکن این روش پرخرج بود و نیز باعث آلودگی خطرناک هوا برای گیاهان می‌شد.

با این‌حال، با آغاز سالهای ۱۸۶۰ نیتروژندهی ترکیبات آلی مستلزم مقادیر روزافزونی اسید غلیظ بود. وینکلر به آزمایشهای خود برای غنی‌سازی اسید اطاقهای سربی ادامه داد و می‌خواست مستقیماً انیدرید سولفوریک را با اکسایش اسید سولفورو در مجاورت یک کاتالیزور، به‌دست آورد.

1. Stark 2. Cl.Winkler

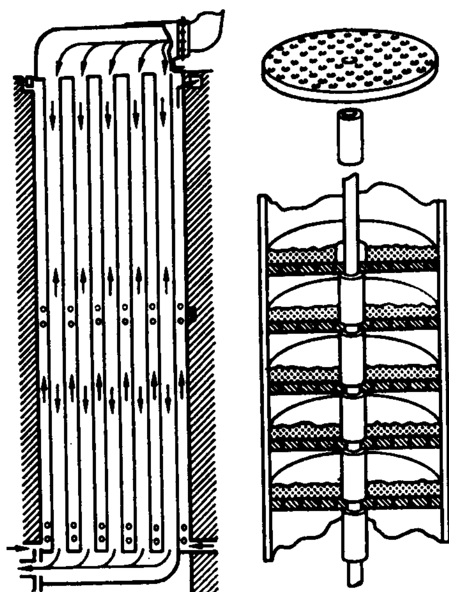
این واکنشی است که در اطاقهای سربی با تشکیل زودگذر سولفات نیتروزیل انجام می‌گیرد. اما چون سولفات نیتروزیل جز در اثر بخارآب در بخارهای نیترو و انیدرید سولفوریک تجزیه نمی‌شود، اسیدی که به‌دست می‌آید جز ۶۰ درجهٔ بومه نیست. بدین‌ترتیب، دشواری کار، انجام دادن این واکنش در بیرون از اطاقهای سربی و با کاتالیزور دیگر است.

وینکلر حق امتیاز یک سرکه‌ساز انگلیسی به نام پرگرین فیلیپس[1] مربوط به سال ۱۸۳۱ را که هرگز مورد استفاده قرار نگرفته بود خرید. وی مخلوطی از گازهای سولفورو و اکسیژن را از لوله‌های شیشه‌ای محتوی پلاتین می‌گذرانید. این لوله‌های کوچک و نازک شیشه‌ای تنها اثری که داشتند تقسیم مخلوط گازها و تسهیل تماس آنها با کاتالیزور بود. وینکلر در مرحلهٔ بعد، از پنبهٔ نسوز پلاتیندار به‌عنوان پخش‌کننده استفاده کرد و کمی بعد دو آلمانی با نامهای هانیش[2] و شرودر[3] برای فعال‌سازی این واکنش از افزایش فشار استفاده کردند.

هرچند که این فرآیند از همین دوران، آغاز سالهای ۱۸۷۰ ازسوی بادیش انیلین اوند زودا فابریک به‌کار گرفته شد، دشواریهای بزرگی هنوز بر سر راه تعمیم آن وجود داشت. از نخستین این دشواریها، تهیهٔ گاز سولفورو، یا مخلوط گاز سولفورو و اکسیژن بود که به آزمایشهای فراوان نیاز داشت. برای دنبال کردن این روش، فکرها شدیداً تحریک شده بودند. اسکوایر مسل[4] در انگلستان و وینکلر در آلمان، بی‌تردید پیش از آن دو نفر، پیشنهاد کردند که این مخلوط را با تجزیهٔ خود اسید سولفوریک در دمای بالا به‌دست آورند. بخار آب که حذف شده بود چیزی که می‌ماند جز فراوردهٔ تجزیهٔ ایندرید سولفوریکی که در اثر کاتالیزور پلاتین از نو تشکیل شده است نبود. این عملیات به‌علت واکنش همهٔ موادی که با آنها می‌توانستند دستگاهها را بسازند، بسادگی انجام نمی‌گرفت. وانگهی، حذف بخارآب هرگز رضایتبخش نبوده است. وینکلر و نیز تعداد زیادی از شیمیدانها در آن زمان پیشنهاد کردند که تخریب خشک سولفات آهن در دمای بالاتری انجام گیرد. مات مصنوعی این ماده را وی قبلاً برای غنی‌سازی اسید معمولی به کارگرفته بود. اما باز همان دشواریها پیش آمدند. می‌بایست این روش تهیهٔ مخلوط گازی را، که مستقیماً از روشهای سنتی تخریب خشک سولفاتها الهام گرفته شده بود، رها کنند.

در این شرایط، تصمیم گرفته شد که از گازهای سولفورو برخاسته از تشویهٔ پیریتها و از هوا استفاده شود، که دشواری دیگری خود را نشان داد و آن این بود که گاز سولفورو باید از ناخالصیها، بویژه ترکیبات ارسنیو، که کاتالیزور را فوراً «مسموم» می‌کند پاک شود؛ و مشکل دیگر، بهای بسیار گزاف پلاتین بود.

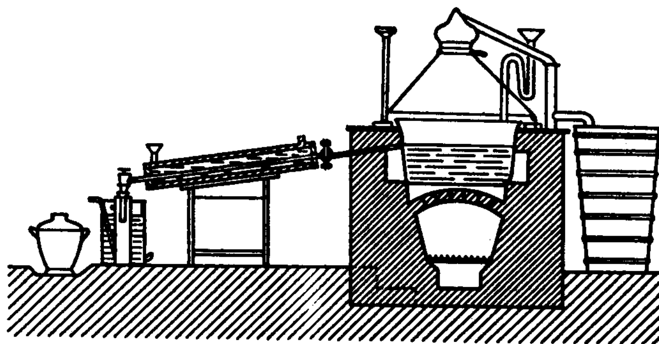
1. Peregrine Philips 2. Hänisch 3. Schroder 4. Messel



شکل ۳۱.ستون کاتالیز.
برای ساخت اسید سولفوریک مجاورتی، سیستم .B.A.S.F مخلوط SO_2 و هوا از بالای ستون، با ارتفاع دومتر، وارد می‌شود و لوله‌های کاتالیز را از پایین به بالا می‌پیماید. نیمهٔ پایینی این لوله‌ها با رویهم‌گذاری صفحات مشبک مجهز به پنبهٔ نسوز پلاتینی تشکیل شده است. گاز SO_2 از پایین مکیده می‌شود. هوای آزاد از پایین وارد می‌شود و در لوله‌های تبادل گرما از پایین تا بالای ستون را می‌پیماید و از بالای ستون، به طرف کوره پیریت فرستاده می‌شود.

با این‌همه تولید مصنوعی اندیگو، حالا در گرو داشتن مقدار روزافزونی اولئوم بود. مسأله در آزمایشگاه‌های بادیش انیلین اوند زودا فابریک و دیگر مؤسسات بزرگ آلمان بشدت بررسی شد. سرانجام دشواریهای اخیر هم در سال ۱۸۹۸ بوسیله آقای ر. کنیچ[1] برطرف شد و کارخانهٔ بادیش انیلین . . . تولید انبوه آن را آغاز کرد (شکل ۳۱). نخست این روش تولید اولئوم در آلمان محرمانه ماند. اما در زمان جنگ جهانی اول، نیاز به اولئوم ناگهان افزایش یافت، زیرا برای نیتروژندهی تولوئن و تبدیل آن به یکی از مواد انفجاری بسیار مؤثر به نام T.N.T لازم بود. دیگر کشورهای وارد در جنگ کارخانه‌هایی برای ساخت آن برپا کردند. دیده شد که این کاتالیزورها می‌توانند ترکیبات

1. R.Knietsch



شکل ۳۲.دستگاه شرکت جانسون ـ ماتی برای تغلیظ اسید سولفوریک.
دیگ پلاتینی به قطر ۶۵ سانتیمتر، دارای سرپوش سربی. اسید از راه قیف سیفونی وارد دستگاه می‌شود. بخارها در خنک‌کنندهٔ سمت راست، مایع می‌شوند. سیفونی اسید غلیظ را در خنک‌کنندهٔ سمت چپ جریان می‌دهد.

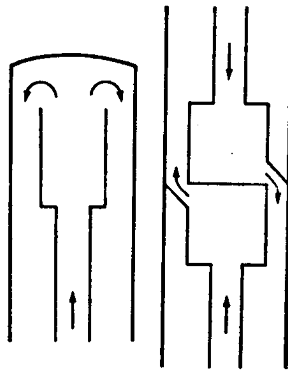
ارزانبهایی، مانند اکسید و انادیوم باشند. درگذر سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۳۰ روش مجاورتی جانشینی روش اطاقهای سربی را آغاز کرد و پس از جنگ جهانی دوم، بروش اصلی تولید اسیدسولفوریک تبدیل شد.

دشواریهای روش مجاورتی: تولید انبوه انیدرید سولفوریک با روش مجاورتی، از همان مراحل نخستین، امکان حذف مرحلهٔ تغلیظ اسید سولفوریک اطاقهای سربی را فراهم ساخت. اسید سولفوریک هم، مانند بسیاری از مواد شیمیایی معمولی دیگر تولیدی صنایع شیمیایی، در بعضی از موارد، رفتارهای بسیارگوناگونی دارد و صنعتگر را گیج می‌کند. در آغاز سالهای ۱۸۸۰ زمانی‌که نیاز به اسید سولفوریک غلیظ بسرعت افزایش می‌یافت، این صنعت خود را در برابر مسألهٔ دشواری یافت که باید آن را حل می‌کرد. اسید سولفوریک در بالاتر از ۶۳ درجهٔ بومه، سرب یعنی تنها جسمی را که در برابر آن هنوز پایدار بود مورد حمله قرار می‌داد. گرچه نخستین مراحل تغلیظ آن را می‌شد در ردیفی از دیگهای سربی که آستری از ورقهای چدنی دارند انجام داد، دنباله کار، می‌بایست در ظروف شیشه‌ای یا بهتر، پلاتین انجام گیرد (شکل ۳۲). در گذر سالهای پایانی سدهٔ نوزدهم، شمار زیادی از وسایل به آزمایش گذاشته شدند که گوناگونی آنها گواهی بر اندیشهٔ مبتکر شیمیدانها و سازندگان آنها بود، و حتی از کارشناسان ساخت وسایل شیمیایی هم استفاده شد. بنابدلایل

گوناگون، شکنندگی در صورت کاربرد ظروف شیشه‌ای، و هزینهٔ بسیار زیاد در صورت استفاده از پلاتین، ظروف تغلیظ را کوچک می‌گرفتند. برجهای تبخیر را که شامل ردیفی از مخزنهای شیشه‌ای بود مایع در آنها پیاپی از بالا به پایین جریان داشت، و ظروف پلاتینی کوچک را، فتچانکهایی از سرب روی آنها بود و به‌طور پیوسته کار می‌کردند با یکدیگر تلفیق کردند. همچنین؛ برای دور زدن مشکلات از راه کاهش فشار نیز آزمایشهایی شد، از روشی که آقای کولمن در سال ۱۸۴۴ پایه گذارده بود یا از روش تبخیر با جریان دادن هوای گرم استفاده کردند.

شمار زیادی از این وسایل و روشها به‌طور مؤثری به‌کار گرفته شدند، که بر اهمیت اسید غلیظ و نیز تعداد زیاد مؤسساتی که آن را تولید می‌کردند دلالت دارد. اما در همهٔ این موارد هزینهٔ ساخت وسایل، خیلی سنگین و ظرفیت تولید، بسیار محدود بود. این وضع نشان می‌دهد که روش مجاورتی تولید اسیدسولفوریک، جای خود را به تلاشهایی داده بود که مدتی حدود ۳۰ سال، لجوجانه دنبال می‌شدند. موفقیت در این کار در مرحلهٔ تغییر سده، دقیقاً پرش از روی مانعی بود که توسعهٔ این صنعت بزرگ شیمی را محدود کرده بود.

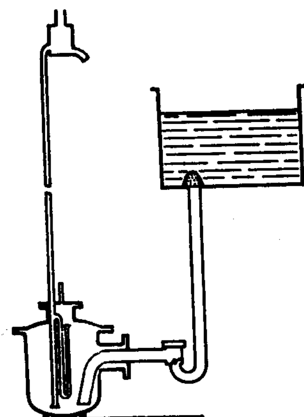
دربارهٔ اهمیت این قضیه و این واقعیت که بالاخره پایان رضایتبخشی برای حل این مشکل یافت نشد ـ زیرا مشکل مربوط به تجهیزات در این روش، لااقل به همان اندازهٔ دشواریهای صرفاً شیمیایی، نظیر کاتالیزور مهم بوده‌اند، هیچ‌گاه حق مطلب ادا نشده است. در واقع تبدیل SO_2 به SO_3 تنها در دمای قرمز تیره، به‌طور کمی انجام می‌گیرد و در دمای بالاتر، این انیدرید تجزیه می‌شود. اما واکنش اکسایش SO_2 گرمازای است و نخستین ناکامیها تا اندازه‌ای به‌علت بالا رفتن زیاد دما در لوله‌های واکنش است که برای شروع کار گرم شده‌اند. زمانی‌که این پدیده بهتر شناخته شد طرح وسایل خنک‌سازی لازم، نسبتاً ساده‌تر گردید. با این‌همهٔ مقداری کارهای آزمایشی با سیستمهای خنک‌سازی از بیرون بوسیلهٔ جریان هوا یا یک فلز مایع وجود داشته است. خوشبختانهٔ، می‌توان گفت که تکنیک تبادلگرهای گرما در آن زمان، هم در رشته متالورژی و هم در شیمی صنعتی پیشرفت فراوان کرده بود، و همین تکنیک بود که بهترین راه‌حل را پیشنهاد کرد و آن، گرم کردن دوبارهٔ گازهایی بود با گردش در اطاقهای مجاورت وارد می‌شوند (شکل ۳۳). نخستین وسایل به‌کار گرفته شده، بسرعت جای خود را به باتریهای تبادلگر گرما واگذاردند. این تبادلگرها از حدود سال ۱۹۰۲ برپایهٔ ضوابطی که در نتیجهٔ سالها استفاده از آنها شناخته شده بودند به‌کار گرفته می‌شدند.



شکل ۳۳.اطاقهای کاتالیز، برای ساخت اسید سولفوریک مجاورتی، سیستم هوخست.
مخلوط سرد SO_2 و O_2 در هر دو دستگاه بوسیلهٔ گاز SO_3 خارج شونده گرم می‌شود، بنابراین دما در اطاق کاتالیز، در اثر گرمای واکنش، بالا رفته است.

دانش شیمی و وسایل ساخت: از آنچه گفته شد باید پذیرفت که تحول صنعت سنگین معدن دو جنبهٔ مکمل یکدیگر و لازم را داشته است. تحقیق روشهای تازه چه برای تولید و چه برای پالایش فراورده‌های ساخته شده؛ تکمیل پیوستهٔ دستگاهها و مصالح کار. مرز میان این دو جنبه غالباً بسیار نامشخص است و از این لحاظ مکمل یکدیگر می‌باشند. بررسی روشهای جدید به دستاوردهای بسیار اخیر دانش شیمی و تجربه‌گرایی آزمایشگاه‌های صنعتی انجامید. کوشش برای خلق ماده‌ای که پاسخگویی نیازهای مربوط به روشهای تازه باشد با ابتکارهای عملگران رهبری می‌شد. در همین دوره بود که تعمیم اطلاعات آزمایشگاهی در شرایط ساختهای انبوه آغاز شد. در این کار نظریه‌پرداز و عملگر غالباً در یک شخص تجسم می‌یافت؛ گرچه باز هم دو بخش این کار را غالباً اشخاص جداگانه‌ای انجام می‌دادند.

دو جنبهٔ این تحول از یکدیگر تفکیک‌پذیر نبودند، زیرا لااقل نمی‌شد تعیین کرد که نظریه تا چه اندازه عمل را رهبری کرده، یا برعکس، به‌دنبال آن رفته است. در مورد ساخت دستگاهها، باید پذیرفت که اصلاح پیوسته آنها شرط اساسی و پیش‌نیاز کاربرد روشهایی بود که برپایهٔ واکنشهایی قرار داشتند که تا آن زمان در مقیاس صنعتی عملی نبودند. مثلاً سفالگری و سرامیک‌سازی، شرایط فنی حکمفرما بر صنایع شیمیایی را تغییر دادند. در پرتو این شرایط، امکانات لازم برای تشکیل یک مجموعهٔ کاری کامل، پیشرفت زیادی کرد. نه‌تنها قرابه‌ها، خمره‌ها دیگها، لوله‌ها، مارپیچها، اجزای



شکل ۳۴.تلمبهٔ تپنده یا تلمبهٔ اسید لوران.
کار این وسیله برپایهٔ کوبش آبی (ضربهٔ قوچ) است. اسید از مخزنی در سمت راست وارد یک ظرف چدنی می‌شود. سطح مایع بالا می‌رود و هوا را متراکم می‌کند. زمانی‌که مایع به دهانهٔ سیفون می‌رسد، هوایی که در لولهٔ کوچک سرپوش متراکم شده است اسید را در لولهٔ بالا رونده برگشت می‌دهد و در همین زمان دریچهٔ مجرای ورود، بتندی بسته می‌شود.

برجها و ستونهای میعان یا جذب، که غالباً براساس مقررات ثابتی ساخته می‌شدند، طرح و ساخت آسان همه وسایل لازم و نیز تغییر دلخواه ساختمان آنها را ممکن کردند، بلکه شماری از وسایل تکمیلی از قبیل: دمها، مکشها، تلمبه‌های اسید، تلمبه‌های معمولی و تلمبه‌های تپنده (شکل ۳۴). نیز از سرامیک، سفال، سنگ‌ماسه ساخته شد و حل مشکل گردش مایعات و گازهای خورنده را گاهی در مدارهای بسیار طویل ممکن ساختند. روشن است که این وسایل برای کارکردن دستگاهها ضرور بودند و در اثر فشار شرایط جدید ساخته شدند اما باز هم می‌بایست تکنیک در سطحی باشد، که ساخت آنها را بتواند امکانپذیر کند.

برای اینکه درک مشخص از عمق تغییر شکلهای صنایع شیمیایی در فاصلهٔ زمانی ۱۸۵۰ تا ۱۹۱۰ به‌طور تقریبی داشته باشیم، باید همان اندازه که تحول وسایل ساخت را بررسی می‌کنیم به اطلاعات شیمیایی به‌کار گرفته نیز توجه داشته باشیم. تجهیزات ماسه سنگی و سرامیکی تنها عناصر وسایل فنی با مشخصات نوینی را که در این دوره ساخته شده‌اند تشکیل نمی‌دهند. آهن و چدن عنصر بسیاری از وسایل و تقریباً همهٔ آنها، با مشارکت دیگر عناصر بوده‌اند.

در گذشته نمونه‌های چندی از آن بررسی شدند. بالاخره بعضی وسایل مکانیکی که در بالا از آنها سخن رفت: کورهٔ گردان، همزنهای گردان. بسیاری از این دستگاهها یا خاص صنایع شیمیایی بودند از قبیل: فیلتر پرس با ظرفیت زیاد، آسیاهای همزن یا اینکه با این صنایع تطبیق داده می‌شدند: خردکننده‌ها، خشک‌کننده‌های گردان، دستگاههای جذب بخارها یا گازهای باقیمانده. مرور بسیار سریع همهٔ این وسایل به ظاهر فرعی اما در واقع پراهمیت در محدودهٔ این شرح چهرهٔ جدید شیمی صنعتی امکان ندارد.

صنعت شیمی پیش از پایان سدهٔ نوزدهم، به یاری این وسایل و تکنیک راه‌اندازی آنها و نیز دستاوردهای مکانیک، توانست نه‌تنها مسائل مربوط به تجهیزات سنگین خود، بلکه حتی، تغییرات این تجهیزات را برای پاسخگویی به نیازهای تولید فزاینده و گوناگون حل کند. بدین‌ترتیب، نه‌تنها به حجم تولیدی این شاخه‌های بزرگ و اساسی افزوده شد، بلکه فهرست وسایل و تولیدهای کوچک نیز که گرچه از لحاظ اقتصادی براساس تناژ تولیدی وزنی ندارند، تأثیر آنها در فعالیتهای بخشهای بزرگ بازرگانی و صنعتی روزافزون است، طویلتر شد.

وانگهی، همهٔ صنعت شیمی در شرایطی بود که بدون گذر از مرحلهٔ انتقالی وارد فازهای تحول شود، فازهایی که پس از اندک مدتی شاهراه سنتزهای بزرگ صنعتی، نخست ترکیبات نیتروژنی و بعد ترکیبات کربنی را در برابر این صنعت گشودند. در واقع برای فهم تحولی که در سدهٔ بیستم دنبال شد باید باز هم یادآوری کرد که این نتایج میوهٔ قابلیتهای به‌کارگیری وسایلی بوده‌اند که بسیار زودتر از شروع عصر صنعت شناخته شده بودند. بعدها همهٔ این وسایل، سنگینی و شکنندگی خود را از دست دادند و نرم و انعطاف‌پذیر شدند. با آغاز دههٔ نخست سدهٔ بیستم، آلیاژهای فلزات، آهنی و ناآهنی ساخته شدند و فهرست آنها در کمتر از نیم سده تنوع شگفت‌آوری یافت. روشهای ساخت وسایل، بدون اینکه اصول معتبر در سدهٔ پیش اکثراً از نو ارزیابی شوند، یکبار دیگر تحول یافتند.

۲

به‌کار بردن مواد آلی طبیعی

در همهٔ تاریخ دیرپای صنعت شیمی، کار تغییر شکل فراورده‌های گیاهی یا جانوری برای استفاده در صنعت یا تغذیه وجود داشته است. ساخت رنگهای طبیعی یا ساخت کاغذ از یک سوی ساخت مشروبات تخمیری از سوی دیگر از نمونه‌های بسیار جالب این کار هستند و قرنها سابقه دارند و تنها در این اواخر، در سدهٔ نوزدهم بود که تغییر شکل بنیادی یافتند. در مجلد پیش دیدیم که در نیمهٔ نخست سدهٔ نوزدهم، رشته‌ای از فعالیت صنعتی بسیار مهم، مثل تهیهٔ قند چغندر و شمعهای استئاریکی ایجاد شد. در جریان صنعت شمع‌سازی و صنعت مواد چرب در دهه‌های میانی این سده، دیدیم که حلال استخراج‌کننده‌ای نظیر سولفورکربن، و ترکیباتی نظیر آن به‌دست آمدند چه دگرگونیهای ژرفی امکانپذیر شد. تقطیر زغال‌سنگ نیز از بنیاد نوعی صنعت تغییر شکل فراورده‌های غیرمعدنی بود. پیداست که این چه بازتابی روی ساختار دانش شیمی می‌تواند داشته باشد و دیده شد که چه بازتاب تاکنون بی‌پایانی کاربرد سوختهای فسیلی نه تنها بر تنوع شاخه‌های صنایع دقیقاً شیمیایی بلکه برروی تحول تقریباً همه تکنیکهای صنعتی و حتی فراتر از این، روی خود طبیعت زندگی بشر داشته است.

تحولی برگشت‌ناپذیر: باز هم نیم سده لازم بود تا صنایعی که از آنها نام بردیم دارای اهمیت اقتصادی چشمگیری شوند. اما در مدتی که آنها در جستجوی مبانی توسعه خود بودند و زمانی‌که آن را یافتند به مرحله تازه‌ای از صنعت شیمی غیرمعدنی گام نهادند که پیشرفت آن به شکلی تقریباً پیوسته، در مدتی حدود هشتاد سال، بین سال ۱۸۵۰ و سالهای ۱۹۳۰ ـ سالهای پیش از جنگ جهانی دوم ـ ادامه یافت.

پیدایش و شکوفایی تکنیکهای تغییر شکل مواد آلی طبیعی، یکی از پربارترین درسهای نویسندگان تاریخ تکنیک است. این پدیده مدتهای زیادی به سکوت برگزار شد یا اینکه بسرعت از روی آن گذشتند زیرا تحت‌الشعاع حوادثی قرار داشت که بسیار چشمگیر بودند، مانند ساخت گاز روشنایی، سپس تهیه رنگهای مصنوعی، که پیش از رسیدن به صنعت سنتز ایجاد شدند.

این حقیقتی است که این صنعت تازه بسیار متنوع است و چنانچه برای تحلیل روشهایش کوشش شود و مواد خام به‌کار رفته و فراورده‌ها را از یکدیگر جدا سازند خود را در برابر انبوهی از جزئیات خواهند یافت که بررسی و شمارش آنها کُشنده خواهد بود. بیهوده درپی ابداع کلیدی هستند که هر بار رشته‌های بزرگ تازه‌ای از فراورده‌ها را روبه‌راه کرده است. گاهی فراورده‌های مختلفی با دید شیمی معدنی یا متالورژی، درجه دوم می‌نمایند. اما هرکدام در رشتهٔ خود به‌روشهای تدارکات و مصرف کلاسیک ضربات قاطعی وارد کرده‌اند. مجموع اثرهای آنها تحول برگشت‌ناپذیری به‌وجود آورد که همان‌طورکه گفته‌ایم، فراتر از محدودهٔ یک صنعت تنهای شیمی است.

مشخصات این مرحلهٔ شیمی صنعتی به دلایل زیر اهمیت کلی دارند. تکنیکهایی که در سایهٔ آنها این مرحله پدید آمد و توسعه یافت، جدید هستند؛ نشان قطع با تکنیکهای سنتی سده‌های گذشته بر آنها مشهود است، که یک تفاوت اساسی با استقرار صنعت بزرگ معدن را تشکیل می‌دهد.

این تکنیکها تنها در پرتو سطح بالای محیط فنی آن زمان ـ طرح و ساخت وسایل پیشرفتهٔ شیمیایی برای برآورده کردن نیازهای صنعت معدن، ساخت ماشینهای صنعتی، شکل دادن ورقهای مس یا آهن، تولید و به‌کارگیری بخار برای گرم کردن، و نیروی محرکهٔ ماشینهای بخار ـ توانستند پیشرفت کنند و بسرعت به مرحلهٔ کاربرد رضایتبخشی دست یابند.

یک مجموعهٔ تکنیکی با مشخصات کلاسیکی: انگیزش برای بهبود صنعتی مواد خام جدید، تحت تأثیر دو عامل کاملاً متفاوت، بسرعت قوت گرفت. از یکسوی ارتقاء سطح اطلاعات علمی از این مواد بود؛ از سوی دیگر بازتابهای اقتصادی وسایل جدید حمل‌ونقل، که در آن زمان هم گردش مواد خام را آسان می‌ساخت و هم جابه‌جایی کالاهای تمام شده را. در تأثیرهای متقابل این دو

عامل که در این زمینه به‌طور قطعی بهتر از دیگر زمینه‌های تکنیکهای صنعتی همین دوران به‌چشم می‌خورند زیاد درنگ نمی‌کنیم.

دیده می‌شود که در خلال سه یا چهار دهه، ۱۸۳۰ ـ ۱۸۶۰، مجموعه‌ای از وسایل فنی بسیار همگون که عملیات بسیار گوناگونی را ممکن ساخت و هرگروه آن، خود پایه‌گذار یک صنعت خاص بود، به‌وجود آمد. این وسایل فنی به یکدیگر وابسته بودند و مجموعهٔ آنها تشکیل یک نوآوری یا یک گروه نوآوریهای مستقل از تکنیکهای صنعتی زمان خود را نداده است. امتیاز آنها، همان‌طورکه گفته‌ایم، موادی هستند که این مجموعه آنها را عمل آورد و فراورده‌هایی که امکان ساختشان را به‌وجود آورد، غالباً زنجیره‌ای را تشکیل می‌دهند که در خانواده تکنیکهای شیمی معدنی، نساجی و غیره جای می‌گیرند یا با آنها تکمیل می‌شوند. این مجموعه، هیچ‌گونه وابستگی با روشهای سنتی نداشت و بسرعت مجموعه‌ای از مشخصات کلاسیکی را تشکیل داد. ازاین‌رو، باید پذیرفت که گرچه وسایل و دستکاری آنها طی حدود یک سده دست‌خوش تحول مهمی بوده است هرگز با روشهای پایه‌ای مطرح در آغاز این مرحله، گسستگی قطعی انجام نگرفته است.

بعدها، مثل همهٔ مجموعه‌های فنی با مشخصات کلاسیکی، برای بی‌نتیجه ساختن این مجموعه کوشش شد بدون اینکه فاز دیگری صریحاً اعلام شود چنین تحولی، خشن نخواهد بود. گذر از ساختاری کلاسیک به یک ساختار تحولی، در اثر نوعی گسستگی برخاسته از بلوغ آهسته روشهای نوین انجام می‌گیرد به‌طورکلی، بحث روشهای صنعت سنتز در میان است که نخستین مقدمات آن در اواخر سدهٔ نوزدهم بوده است، گرچه بلوغ کلی، تنها در نیمهٔ نخست سدهٔ بیستم بود.

کائوچو

نخستین کاربردهای آن: صنعتی شدن کائوچو، نمونه خوبی از پیدایش تکنیکهای نوین در یک محیط فنی است که به پیشرفت لازم برای تولد چنین تکنیکهایی دست یافته است. دانشمندان اعزامی به رهبری آقایان لاکوندامین و بوگر به امریکای جنوبی در ۱۷۳۶ کائوچوی خام را به اروپاییان شناسانیدند. در اواخر سدهٔ هجدهم بود که واردات آن در مقادیر کم به انگلستان آغاز شد و آن را به عنوان مداد پاک‌کن می‌فروختند. چندی نگذشت که راههای استفاده از شکل‌پذیری، کشسانی و نفوذناپذیری آن را برای ساختن توپهای بازی، تسمه‌ها برای نوارپیچی و اتصالات و لوله‌ها یافتند. در همین زمان بود که نخستین دستگاههای همزن صمغها، شست‌وشو و خالص کردن آنها، برش آنها به‌شکل نوار و سپس به‌شکل نخ و بالاخره ساختن ورقهایی باکشش آنها طرحریزی شدند. طی دههٔ

۱۸۲۰، فراورده‌های کائوچو، گوناگونی خود را شروع کردند و آقای مکینتوش نخستین پارچه ناتروا را اختراع کرد که قرار بود از آن برای ساختن لباس استفاده شود. برای این کار پارچه‌های پنبه‌ای را با مخلوطی از کائوچو و اسانس تربانتین آغشته می‌کرد.

عمل‌آوردن کائوچو با گوگرد: در سال ۱۸۳۹ آقای هیوارد[1] متوجه شد که مقدار کمی افزایش گوگرد سبب می‌شود که یکی از معایب بزرگ کائوچو ـ تأثیر دما روی شکلپذیری و کشسانی آن ـ کاهش یابد. آقای چارلز گودیر که در امریکا نماینده آقای هیوارد بود، در همین سال به‌نام خود نخستین امتیاز این روش را، که بسیار مبهم به‌دست آورد. وی در ۱۸۴۴ زمانی‌که آقای هنکاک روشی برای آب دادن کائوچو در حمامی از گوگرد مذاب را شرح می‌داد، نتایج کار خود را به‌طور کاملتری منتشر کرد.

عمل‌آوردن کائوچو بوسیله گوگرد در آغاز ولکانیزاسیون[2] اصطلاح شد، که ساختهٔ آقای هیوارد بود و پس از مدت کوتاهی وولکانیزاسیون شد[3]. با این روش جسمی در اختیار بود که تغییر دما، مشخصات آن را تغییر نمی‌داد. پدیدهٔ وولکانیزاسیون توجه شیمیدانها را جلب کرد. بیشتر شیمیدانها کم‌وبیش وابسته به مؤسسات تولید صنعتی کائوچو بودند و این واکنش را در آزمایشگاه بررسی می‌کردند. اینان امیدوار بودند که این صنعت را پیشرفت دهند.

پس از مدت بسیار کوتاهی و بویژه پس از کارهای آقای آنسلم پاین که در ۱۸۵۲ منتشر شد، اطلاعات ارزشمندی از خواص شیمیایی کائوچو و چند نظر اجمالی دربارهٔ ترکیب شیمیایی آن به‌دست آمد. پاین ترکیب عنصری آن را با فرمول C_8H_7 مشخص ساخت؛ اما وضع اتمی آن در آن زمان بسیار مبهم بود، زیرا این فرمول می‌توانست فقط همچون راهنمایی در پژوهشهای صنعتی باشد. تنها پس از کارهای آقای بوشاردا[4] در ۱۸۷۹ بود که ساختار عنصری کربید با دو پیوند دوگانه، ایزوپرن $CH_2=C(CH_3)-CH=CH_2$ در ساختمان کائوچو پذیرفته شد. آقای وبر در طی سالهای ۱۸۹۰ تحقیقاتی برای تعیین ساختاری زنجیری انجام داد که در آن ایزوپرن، که در آن زمان فرمول آن را $C_{10}H_{16}$ می‌نوشتند باید شبکهٔ اساسی را تشکیل دهد. وبر، ترکیب نخستین را $(C_{10}H_8)_n$ نوشته است تا فرمول کائوچو را نشان دهد. اطلاعات تازه، تنها با تحقیقات شیمیدانهای متعدد، بویژه کارهای اشتاودینگر در ۱۹۲۲، سپس کارهای میير و مارک که در فصل مربوط به صنعت سنتز دربارهٔ آنها سخن خواهیم گفت، به‌دست آمدند.

باوجود این تردید دراز مدت دربارهٔ ترکیب و ساختار کائوچو، صنعت تهیه و تغییر شکل آن بسرعت پیش رفت. شیمیدانها برای اینکه بفهمند که اثر وولکانیزاسیون همانا تثبیت گوگرد روی

1. Hayward 2. Volcanisation 3. Vulcanisation 4. Bouchardat

مولکول پایه است خیلی تحقیق کردند ولی تنها کارهای تجربی به آنها نشان داد که برای اینکه تثبیت گوگرد پایدار بماند و خواص کشسانی کائوچو حفظ شود، این تثبیت باید در بخش بسیار کوچکی انجام گیرد.

روشهای گودیر و هنکاک برای وولکانیزاسیون درگرما منحصر به قطعاتی می‌شد که شکل گرفته بودند. وولکانیزاسیون در واقع کائوچوی ناخالص را در خود جوشکاری می‌کرد. آنها فراورده‌های تمام شده را در معرض چنین عملی قرار می‌دادند و آنها را بی‌درنگ به‌کار می‌گرفتند. و ساخت انواع ممکن آنها بشدت بررسی شدند.

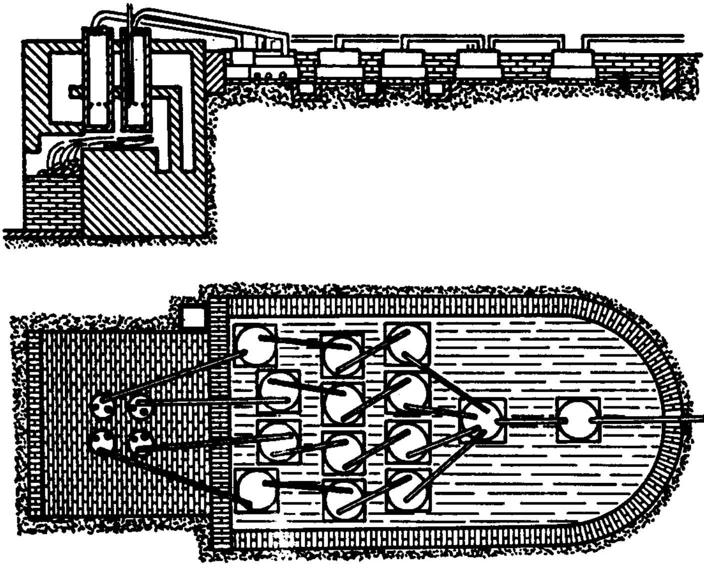
سولفورکربن: بهترین نوع آن را آقای پارکس[1] در سال ۱۸۴۶ کشف کرده بود. به‌جای کاربرد گوگرد داغ، پارکس اندیشید که از ترکیبات گوگردی که آسان تجزیه می‌شوند استفاده کند. وی فرو بردن قطعات کائوچویی را در سولفورکربن مایع سرد محتوی درصد کمی (۲٫۵٪) کلرور گوگرد پیشنهاد کرد. در این زمان هر دو ترکیب تنها مواد مورد تحقیق آزمایشگاهی بودند و بهای آنها، علی‌رغم تهیهٔ سهلشان زیاد بود.

قدرت حلالیت سولفورکربن توجه صنعتگری از مارسی را به خود جلب کرد. این شخص که دایس[2] نامیده می‌شد وسیله‌ای برای تولید زیاد اندیشید (شکل ۳۵). این وسیله اساساً شامل یک باتری از چهار قرع استوانه‌ای بود که عمودی درکوره گذاشته می‌شدند. در این قرعها زغال چوب می‌ریختند و قرعها را تا حد قرمزی گرم می‌کردند. سپس، به‌طور منظم بارهای گوگرد را در آن وارد می‌کردند که درکف دوگانه می‌سرید. بخارگوگرد با زغال ترکیب می‌شد و سولفورکربن از زبانه‌های بالایی فرار می‌کرد. بخارها از روی یک ظرف سرد شده می‌گذشتند که در آن گوگرد ترکیب ناشده رسوب می‌کرد. سولفورکربن در پایان تقطیر میعان می‌یافت و سپس خالص می‌شد.

دستگاه دایس بهبود اقتصادی نسبتاً مهمی از جسم را درپی داشت؛ بهای گوگرد از ۵۰ فرانک برای هرکیلوگرم در ۱۸۴۰ به ۸ فرانک در ۱۸۴۸ پایین آمد. وسایلی که در آغازکار طراحی شده بودند بسرعت اصلاح گردیدند و در ده سال بعد، همین فراورده به ۵۰ سانتیم برای هرکیلوگرم رسید.

نوسانهای جریانهای بازرگانی گوگرد را نیز باید به‌حساب آورد. در واقع، این زمانی بود که عوارض غیرمنطقی مقرر برای گوگرد، صنایع را به عملیات تشویهٔ پیریت‌ها برای تهیهٔ گاز سولفورو در اطاقهای سربی تشویق می‌کرد. نوعی تغییر مسیر همه را به طمع می‌افکند و تولیدکنندگان سیسیلی به رهاکردن روش سنتی کورهٔ جریانی و روی‌آوردن به تجهیزاتی که بتوانند بازده و مرغوبیت انواع گوناگون گوگردهای تجارتی را بالا ببرند دست به‌کار شدند. برای نجات این صنعت در سیسیل، حتی

1. Parkes 2. Deiss



شکل ۳۵.دستگاه دایس برای تهیهٔ سولفید کربن.
در سمت چپ، کوره‌ای که چهار قرع استوانه‌ای از گل نسوز، با آستری از زغال و گوگرد روی آن قرار دارند. در سمت راست، باتری خنک‌کننده با حباب‌سازی در آب؛ در انتهای این باتری یک ظرف جمع‌کنندهٔ مشترک بخار گذاشته شده است. سولفورکربن در ته باتری خنک‌کننده رسوب می‌کند و به بیرون سیفون می‌شود.

به مرمت راهها و تأسیس شبکهٔ راه‌آهن هم تصمیم گرفته شد.

تولید صنعتی سولفورکربن را آقای دایس برای عمل‌آوردن باقیمانده‌ها، که آن را گلیسرین قطرانی می‌نامیدند، طراحی کرد و برای این کار صابونی کردن سولفوریکی روغنها و بویژه روغن نخل را پیشنهاد کرد.

وی توانست با استخراج از سولفورکربن، نزدیک به ۲۰٪ اسیدهای چربی را که در گذشته تلف می‌شدند بازیابی کند. این روش بی‌درنگ به استخراجهای دیگری از همین ردیف انجامید: کنجاله‌های دانه‌های روغنی؛ تفاله‌های عصاری پیه ذوب شده و باقیمانده‌های استخراج موم عسل؛ استخوانهای قصابی؛ روغن موتور سوخته؛ و بالاخره کهنه‌پاره‌ها و وازده‌های تعمیر و روغنکاری ماشینها، بویژه لوکوموتیوها. در مواردی مقدار تولید فرانسه با این روش، از چندین صد هزار تن در

سال بیشتر بود. به‌کارگیری کهنه پاره‌های چرب، دشواری انبار کردن آنها را، که با احتمال خطر و خراب شدن آنها همراه بود، از میان برداشت و مزیت بازیابی همزمان هم پارچه‌ها و هم مواد چرب در آن بود. نوعی تجهیزات کامل با سرعت زیاد برای صنایع دیگر استخراج و تقطیر، انطباق داده شدند. آقای دایس با سرمایهٔ خود چندین کارخانه برپا کرد و شعباتی در فرانسه و خارج تأسیس کرد.

قدرت حلالیت سولفید کربن به اجسام دیگری مانند یُد، فسفر سفید و گوگرد و کلرور گوگرد گسترش یافت. تهیهٔ این ترکیب نیز ساده بود. کافی بود که گاز کلر روی گوگرد مذاب عمل کند و کلرور به‌دست آمده را با تقطیر، خالص کنند. بدین‌ترتیب، روشی که پارکس برای وولکانیزاسیون سرد کائوچو پیشنهاد کرده بود می‌توانست در سایهٔ همکاری عوامل فن و اقتصاد آن دوره بیدرنگ در صنعت به‌کار گرفته شود.

هوا ناپذیری: در فرانسه صنعتگران متعددی: پرونسل[1]، گیبال، ژرار[2] براین‌پایه، ساخت فراورده‌های گوناگونی از کائوچوی خالص یا همراه با پارچه ـ تکه‌های لباس، لوازم جراحی، تسمه‌های انتقال حرکت ـ را به‌عهده گرفتند. وسایل کار و تغییر شکل آنها، طی ده سال به شاخه‌های متعددی تقسیم شدند: مخلوط‌کننده‌ها، آسیابها، پرسهای برش، نوردها، غلتکهای اطوی پارچه، سنبه‌های روزن‌رانی و غیره. همهٔ این مرحلهٔ عریض، چارچوب تکنیکی بود که بعدها صنعت ساخت اجسام پلاستیکی مصنوعی می‌بایست در آن گسترش یابد.

وولکانش سرد بی‌شبهه کلید راه‌اندازی صنعت کائوچو می‌باشد، گرچه وولکانش گرم در گوگرد مذاب، یا مخلوط شدن با نسبتهای متناسب از گوگرد هنوز وجود داشت و اصلاحات متعددی در آن انجام می‌گرفت که از آن جمله کاربرد کاتالیزگرهایی بمنظورهای گوناگون بود. روش دیگری از وولکانش سرد بعدها پیشنهاد شد، در این روش فعل‌وانفعال سولفور هیدروژن بر گاز سولفورو، گوگرد تماس آزادی با کائوچو می‌یافت. اما در دوران نخستین گسترش کائوچو، روش مونو کلرور گوگرد محلول در سولفورکربن برای تهیهٔ اشیاء کوچک بسیار به‌کار گرفته می‌شد.

دقیقاً همین روش بود که ساخت لاستیکهای رویی اتومبیل را ممکن ساخت. این لاستیکها طبعاً برای اتومبیلهایی به‌کار گرفته شدند که نخستین نمونه‌های آنها در سال ۱۸۹۰ به فروش رفتند و مجهز به وسایل ساده‌ای ـ نظیر موتور، مکانیسم انتقال حرکت، فرمان و ترمز، اما بدون شاسی و دستهٔ فرمان ـ بودند.

کمی پیش از پیدایش وسایل نقلیهٔ موتوردار، لاستیکهای دوچرخه برای تأمین مؤثر توازن این وسیله، اختراع شده بودند. ساخت اولیهٔ این لاستیک، مدیون یک دامپزشک انگلیسی به‌نام جان

1. Peroncel 2. Gerard

بوید. دنلپ است که در اندیشهٔ تعویض لاستیکهای توپر طوقه‌ها (که حدود پانزده سال بود به‌کار می‌رفت) با لوله‌ای توخالی بود که پیوسته با باد پر شده بوسیلهٔ نوار کوچک و چسبنده‌ای روی طوقه ثابت می‌گردید. اگر این لاستیک می‌ترکید می‌بایست همه آن را پیاده کرد و با قبول همهٔ دشواری کار، لاستیک نوی به‌جای آن گذاشت. چند سال پس از آن، در ۱۸۹۵، آقای آندره میشلن لاستیک توخالی را از کائوچوی نازک (تویی) که با رویه‌ای از کائوچوی ضخیمتر (رویی) حمایت می‌شد، اختراع کرد. این وسیله بی‌درنگ با استقبال زیاد مواجه شد، اما سیستم دنلپ که مناسب‌تر بود، رواج خود را از دست نداد. ناگفته پیداست که در روزگار ما، در سایهٔ روشهای پنچرگیری سریع، تایر تکی روی به پیشرفت دارد.

ساخت لاستیک تویی و رویی برای دوچرخه، سپس چند سال بعد برای اتومبیلها، بازار تازه‌ای برای صنعت کائوچو فراهم کرد. هنوز اشیائی که از کائوچو ساخته می‌شدند غالباً فراوردٔه‌های جانشینی بودند و بیشتر بخاطر ارضای حس کنجکاوی ساخته می‌شوند تا کاربرد عملی. برای کاربردهایی که کائوچو ضرور است ـ لوله‌های گاز خانه‌ها، انواع بالونها، لوازم جراحی ـ مصرف مواد خام نسبتاً درحد پایین باقی ماند. کائوچو هنوز نتوانسته بود جای مواد مصرفی برای تهیهٔ پوشاک، مواد بسته‌بندی، و ظروف را بگیرد. تنها صنعت پوشاک ناتراوا (امپرمابل)، بازار چشمگیری داشت.

با گسترش سریع دوچرخه از حدود سال ۱۸۹۰، سپس رواج آهستهٔ اتومبیل از سال ۱۹۱۰، صنعت کائوچو اهمیت اقتصادی تازه‌ای یافت. وولکانش سرد برای ساخت لاستیکهای تویی و رویی روشی بسیار عملی بود. در فاصلهٔ زمانی ۱۹۰۰ ـ ۱۹۲۰ تولید لاستیکهای بادی سه‌برابر شد. ساخت این فراورده بدین‌ترتیب گسترش زیاد یافت. اما وولکانش، حلالی را که پس از تقطیر از نو به‌کار گرفته شود مصرف نمی‌کرد زیرا تثبیت گوگرد برای کلرور گوگرد زیانبخش است. تنها اتلاف معمولی در هر گردش را می‌شد جبران کرد. در سالهای نخستین سدهٔ بیستم ساخت گزانتات سلولوز برای تهیهٔ ابریشم مصنوعی، صنعت نوین مصرف‌کنندهٔ سولفورکربن را پدید آورد و نیز دسترسی آزاد به این مادهٔ خام، به سود گسترشهای نخستین آن بود.

ابونیت: برای نگاه‌داری خواص کشسانی کائوچو، کار تثبیت گوگرد در مدت وولکانش باید با آهستگی تمام انجام می‌گرفت. کارشناسان نخستین در واقع بیدرنگ متوجه شدند که اگر گوگرد تثبیت شده کمی اضافه باشد، این خواص از بین می‌روند. آقای گودیر از این پدیده در سال ۱۸۴۸ برای تهیهٔ صنعتی فراورده‌ای سخت، با رنگ تیره، که بتواند مانند شاخ عمل کند سود برد و این فراورده با نام ابونیت بی‌درنگ به بازار آمد. گویا این نخستین فراوردهٔ جانشینی اشیاء عاج مانند

بود. ابونیت کاربرد خود را در ساخت وسایل برقی، کرستها و شمار زیادی از اشیا باز کرد. یکی از فواید ابونیت امکان تهیهٔ آن با کائوچوهای خام درجهٔ دوم بود که برای مقاصد دیگری، مستلزم خالص‌سازی پرهزینه‌ای می‌شد. عمل آوردن گرم آن در آب، به دنبال آن، ریش‌ریش کردن و خمیر کردن امکان می‌داد که ۵۰٪ وزنی گوگرد در آن وارد شود. بعداً آن را می‌بریدند، یا در حالت خمیری آن را قالبگیری می‌کردند و کار وولکانش درگرمای بخار آب انجام می‌گرفت. ابونیت علاوه‌بر حالت شکلپذیری خود پیش از عملیات نهایی، این مزیت را هم داشت که دربرابر عوامل شیمیایی، هوا و آب تحت تأثیر قرار نمی‌گرفت و دربرابر اصطکاک پایدار بود. صنعتگران توانستند با تزریق رنگهای معدنی در جریان عملیات اولیه انواع گوناگونی از آن بسازند.

گوتاپرکا (صمغ مالایا): باز در همین زمینه، یکی از بزرگترین نوآوری این زمان، فراورده‌ای بود که مانند کائوچو از شیرابه خانواده‌ای از درختان، با نام Sapotacés به‌دست می‌آمد ـ امولسیونی با جرمهای گلوبولی که با عمل آوردن ساده‌ای برای کلوخه‌ای شدن به‌شکل تودهٔ سخت و لیفی آماده می‌شد. گرچه فرمول شیمیایی خام و نیز ریشهٔ آن به کائوچو نزدیک است، گوتاپرکا به‌علت کمی کشسانی با آن تفاوت دارد.

پزشکی از انگلستان به‌نام مونتگومری[1] در بندر سنگاپور، که در سال ۱۸۴۲ به مطب خود در کلکته نقل مکان می‌کرد، نمونه‌هایی از صمغ سوماترا (نام مالزیایی سوماترا، پرکا بود) را با خود برد. این صمغ را بومیان آنجا برای ساختن ظروف و دستهٔ اشیا به‌کار می‌راند. این مادهٔ تازه در اروپا با استقبال روبه‌رو شد و از آن برای برقراری شبکه‌های بزرگ تلگراف استفاده کردند. این ماده بدلیل چکشخواریش در گرما و عایق‌بودن زیاد، برای روکش سیمهای برنجی آمادگی کامل داشت و در طی سالهای ۱۸۶۰ به‌جای پیچیدن نخهای ابریشم روی سیمها، (که کاری بسیار رنج‌آور و پرهزینه بود) از آن استفاده شد. گوتاپرکا، علاوه بر عوامل دیگر، استقرار خطوط زیرزمینی و زیردریایی تلگراف را ممکن ساخت. حدود سال ۱۸۸۰ که تولید برق صنعتی آغاز شد، گوتاپرکا باز هم کاربرد بیشتری به‌دست آورد و تا پیدایش عایقهای مصنوعی در آغاز سالهای ۱۹۳۰، عملاً مسؤولیت این کار به عهدهٔ آن بود.

یک پدیدهٔ انتقال: تاریخ کائوچو و فراورده‌های مشابه، از چند لحاظ نمونه هستند. نخست نوعی انتقال تکنیک به کشورهای صنعتی، به‌اصطلاح امروزی از کشورهای عقب‌مانده به کشورهای پیشرفته در میان است، که یک انتقال غیرعادی است. قطعاً در گذر سده‌ها و حتی هزاره‌های پیشین، انتقالهای متعددی از شرق به غرب، از آسیا یا امریکا به اروپا انجام گرفته است. اما همیشه

1. Montgomerie

بین کشورهای مبتکر و کشورهای دریافت‌کنندهٔ ابتکار، حتی اگر نوع تمدن این کشورها، بسیار هم متفاوت بودند، تعادل برقرار بوده است. تا آغاز سدهٔ نوزدهم، همه کشورها، اقتصادی اساساً کشاورزی داشتند. مواد رنگ و بعضی از الیاف بافندگی را که کنار بگذاریم، حداقل مبادلهٔ در زمان بسیار اخیر، فراورده‌های غذایی از ذرات، قهوه، کاکائو گرفته تا سیب زمینی بودند، که اروپاییها از فراوردهٔ اخیر در ربع دوم سدهٔ نوزدهم در سایهٔ ماشینیسم به صنعت نشاسته‌سازی رسیدند.

در مورد پنبه تذکر خاصی لازم است. ریسندگی و بافندگی این فراوردهٔ بومی، در نیمهٔ دوم سدهٔ هجدهم در بریتانیای کبیر صنعتی شدند. اما پنبه وارد تمدن صنعتی نشد. این یکی از عوامل، اما نه نخستین، راه‌اندازی پدیدهٔ صنعتی شدن غرب اروپا بود.

تکنیکهای کاربرد کائوچو به‌شکل تجربی بوسیله بومیان امریکای جنوبی و آسیای جنوب‌شرقی بسیار زودتر از اروپا مورد استقبال قرار گرفتند. این تقدم بدین دلیل بود که اروپاییها برای به‌کارگیری آن تأمل داشتند و تنها زمانی آن را مورد استفاده قرار دادند که تکنیکهای خاص صنعتی آن به سطحی عالی دست یافته بودند. آنان این تکنیکها را در تکنیک پیشرفته سدهٔ نوزدهم وارد کردند تا مکمل این تکنیک پیشرفته باشد؛ آنان این تکنیک را تغییر شکل و پیشرفت دادند و بر روی این پایه‌های اولیه، یکی از صنایع دارای اهمیت اقتصادی درجهٔ اول سدهٔ بیستم را بنا نهادند.

عوامل متعددی به سود این دستاورد بودند، که در زمانهای دیگری، مساعد نخواهند بود این عوامل در عین فنی بودن، اقتصادی نیز می‌باشند: دسترسی آزاد به فراورده‌های تغییر شکلی شیمیایی؛ منابع انرژی صنعتی؛ وسایل گرمسازی؛ تجهیزات؛ وسایل حمل‌ونقل؛ کاربرد در صنایع دیگری که بعضی از آنها در صورت نبودن این مواد، پیشرفتشان دشوار بود؛ و توزیع و مصرف فراورده‌های تمام شده به برکت وجود مبانی گستردهٔ بازرگانی. علاوه‌بر اینها، تنوع کاربردها، خواص شکلپذیری یا کشسانی موادی که با فراورده‌های طبیعی درمان شده‌اند انگیزهٔ گرایش به آفرینش مواد جدید: در آغاز مواد صنعتی و بعد سنتزی برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون بود. بعداً خواهیم دید که این صنعت جدید مواد شکلپذیر در چه شرایط و در سایهٔ چه عوامل مساعدی در پایان سدهٔ نوزدهم تولد یافت و در سدهٔ بیستم از چنان پیشرفت فنی برخوردار شد که در سه دههٔ نخست این سده، حتی رؤیای آن را هم نداشتند. این پیشرفت همراه با پدیده‌های دیگر نوآوری، بازتاب قابل توجهی بر ساختار تکنیک پیچیدهٔ معاصر داشته است.

سلولوز

کاربرد صنعتی سلولوز، ریشه در گذشته‌های دور دارد و آن ساخت کاغذ از برگ گیاهان است. همان‌طورکه می‌دانید، در طول سده‌ها مادهٔ خام اصلی این فراورده، پارچه‌های کهنهٔ کتانی و کنفی و بعد، زمانی‌که کاربرد پنبه در اروپا فراوان شد، پنبه‌ای بود. با این‌همه، همیشه گیاهان لیفی را مستقیماً برای ادغام در خمیر پارچه‌های کهنه، زمانی‌که نیازها زیاد می‌شد، یا برای ساخت انواع مختلف کاغذ به‌کار می‌بردند. ردیف این گیاهان برحسب منابع گوناگون نواحی جهان: آگاو[۱]، چتایی، نی، کاه، حصیر، شاخه‌های جوان درختان و بوته‌ها بسیار گوناگون بود. مواد جانشینی ـ جز در بعضی نواحی ـ تا اواسط سدهٔ نوزدهم به‌مقدار کم به‌کار برده می‌شدند. در اروپا خمیر پارچه‌های کهنه تنها ماده اولیه صنعتی باقی مانده بود.

این فراورده‌ها و تصرفات مکانیکی یا شیمیایی مواد گوناگون، مورد آزمایشهای میکروسکوپی و آنالیزهای شیمیایی قرار گرفتند و درپی این کارها، اجزای متشکلهٔ گیاهان، از جمله سلولوز، شناخته شدند. آشنایی با طبیعت شیمیایی سلولوز مدیون چندین شیمیدان سدهٔ نوزدهم است که اصولاً از نظریه‌پردازان بزرگ آن زمان نبودند: پراوت، شلایدن، براکونو، پاین، هوفمان[۲]، بشان[۳]، شوایتزر[۴] . . . اما کارهایشان سبب شد که ترکیب فراورده‌های دارای منشأ گیاهی یا حیوانی، که مدتها صنعتگران آنها را به‌کار می‌بردند یا به‌عنوان غذا به‌کار می‌رفتند، دقیقاً روشن شوند. باز بدین‌ترتیب بود که فرمول خام سلولوز معین شد و معلوم شد که این ماده، در شکل نشاسته و آمیدون در پایان به گلوکوز می‌انجامد. با تعیین فرمول خام $C_6H_{10}O_5$، که نویسندگان گوناگون ضرایب مختلفی برای آن نوشته‌اند، سلولوز درگروه هیدراتهای کربن جای می‌گیرد و خواص شیمیایی آن در سالهای ۱۸۵۰ ـ ۱۸۶۰ بخوبی شناخته شد. ساختار مولکولی آن بعدها در سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۳۰ با روشهای فیزیکوشیمیایی مشخص گردید.

کاغذ رول: نیازهای روزافزون به کاغذ در ربع دوم سدهٔ نوزدهم ایجاب می‌کرد که کمبود خمیر کهنه پاره با خمیر سلولوزی که از گیاهان به‌دست می‌آید جبران شود ـ کاری که هنوز در اروپا رواج دارد. این نوآوری نه‌تنها در پرتو پیشرفت شیمی، بلکه بدلیل وسایل مکانیکی که برای تهیهٔ خمیر کهنه پاره اصلاح شده بودند، به‌دست آمد.

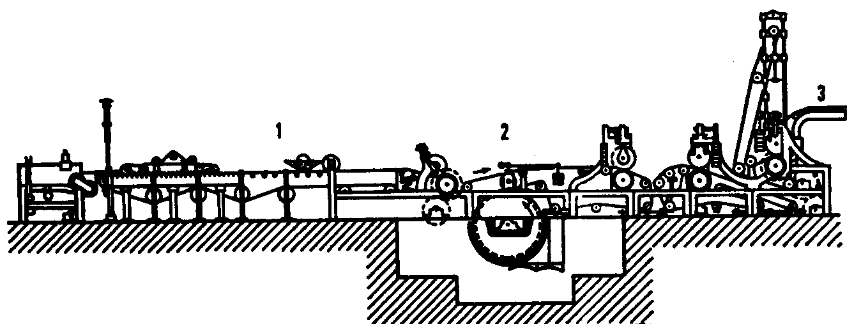
دستگاههای ساخت کاغذ رول که مبانی آنها در مجلد پیشین شرح داده شد (صفحه ۸۰۲)

---

۱. agave: گیاهی از تیره نرگسیان با برگهای ضخیم نیزه‌ای که از الیاف آن در بافندگی استفاده می‌شود.ـم.

۲. Hofmann، اوگوست ویلهلم فون (۱۸۱۸ـ۱۸۹۲): شیمیدان آلمانی.ـم.

3. Bechamp 4. Schweizer

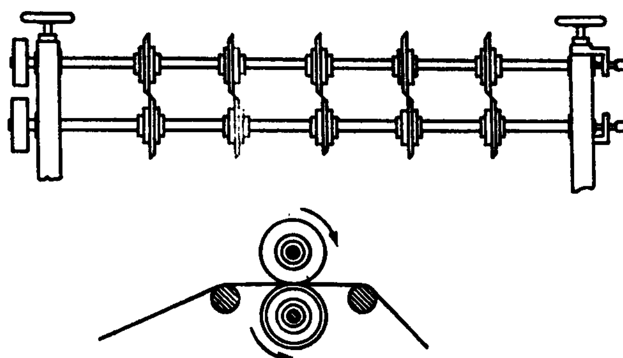


شکل ۳۶.دستگاه دو میزی کاغذسازی.

دستگاه دو میزی: سمت چپ، یک میز افقی، خمیر کاغذ در دیگی (۱) قرار دارد روی میز به‌سوی چپ پهن می‌شود و از پایین به سمت راست برمی‌گردد. میز دوم در قسمت ۲، استوانه‌ای است که دیگ خمیر کاغذ در آن قرار دارد. این خمیر با نخستین فشار آوردن به قسمت پایین، از خلال جدار استوانه، روی نمد جاری می‌شود. خمیر وارد فضاهای متعدد استوانه می‌شود. هر دو برگ پیوسته، دقیقاً بالای دیگ استوانه‌ای به هم اتصال می‌یابند و با گذشتن از یک ردیف دستگاه پرس، که آنها را با هم می‌چسباند به‌سوی راست کشیده می‌شوند. کاغذ در قسمت ۳ بیرون می‌آید. ماشین دیگری که آن‌هم بزرگ و از ردیفهایی از استوانهٔ خشک‌کننده تشکیل شده بود، جانشین دستگاه دو میزی شد. شکل بالا را با شکل ۴۴ صفحهٔ مجلد سوم مقایسه کنید تا از پیشرفت وسایل مکانیکی صنعت شیمی، در برههٔ نیم سده، تصوری داشته باشید.

حدود سال ۱۸۲۰ به‌طورکلی مورد استفاده قرارگرفت. این دستگاهها برای اینکه عملیات چسبزنی و خشکانیدن نهایی به‌طور مکانیکی در زمان بیرون آمدن از دستگاه غلتکزنی و خشک کردن خمیر انجام گیرد بیدرنگ تکمیل شدند. برای ساختن انواعی از کاغذها، عمل چسبزنی و افزایش مواد گوناگون برطبق عادت در خود خمیر انجام می‌گرفت؛ خمیر پیش از اینکه از خود دستگاه کاغذ سازی (شکل ۳۶) بگذرد به‌طور مکانیکی مخلوط می‌شد.

ساخت کاغذ رول، تنها زمانی توانست توجه واقعی را به خود جلب کند که عملیات اتمام، مکانیکی شد. این عملیات قبلاً با دست انجام می‌گرفت. مکانیسین‌های انگلیسی در انتهای دستگاه کاغذ نیم‌تمام، یک دیگ صمغ‌زنی با حرکت پیوسته و یک باتری متشکل از ۴۹ بشکهٔ خشک‌کننده گذاشته بودند. این واحد ساخت، مجموعهٔ مکانیکی جالب توجهی را تشکیل می‌داد. با پیشرفتهایی که در کار تراش دنده‌ها حاصل شد، امکان رسیدن به چنین نتایجی فراهم آمد. در واقع گردش چرخها و غلتکها، که خمیر بین آنها پنهان بود، سپس کاغذ نیم تمام در جریان خشک



شکل ۳۷.قیچی دیسکی کاغذ، ویژهٔ دستگاههای ساخت کاغذ رول.

شدن، و بالاخره کاغذ موجود در دستگاه صمغزنی و سرانجام کاغذ صمغ‌زده شده باید بسرعت مناسبی دقیقاً تنظیم شوند تا اینکه برگ کاغذ با هیچ‌گونه کششی، که ممکن است آن را در بخشی از تولید پاره کند مواجه نشود.

باز هم باید گفت که این تجهیزات جالب با ماشینهای قیچی تکمیل شدند. این ماشینها به‌طور مکانیکی رول کاغذ را در عرضهای مناسب برای قطع مورد نظر در جریان تولید می‌چیدند (شکل ۳۷). این قیچیها، زوجهایی از دیسکهای تیز، نصب شده بر روی محورهای موازی یکدیگر بودند. و برگ کاغذ در پایان مسیر تولیدی خود از میان آنها می‌گذشت.

ساخت کاغذ بدون وقفه بود. تنها به مراقبتی درحدامکان زنان و کودکان نیاز داشت. زمانی‌که کار شب کودکان ممنوع اعلام شد، قیچیها از زنجیرهٔ تولید جدا شدند و برگها روی یک رول جمع می‌شدند؛ آن‌گاه همهٔ تولید ۲۴ ساعتی دستگاه، در ده ساعت کار قیچی می‌شد.

انواع دیگری از ماشینهای کاغذسازی در انگلستان اختراع شدند. دستگاههایی که میز مسطح برای نخستین مرحلهٔ بی‌آب کردن (چکه‌کشی) خمیر بود جای خود را به یک میز استوانه‌ای با توزیع‌کنندهٔ خودکار خمیر در بازوی کارتر محیط بر استوانه داد. دستگاههای دو میزی که تولید کاغذ ضخیمتر را با پرس کردن یک برگ روی دیگری، ممکن می‌ساخت موازی با آن کار می‌کرد.

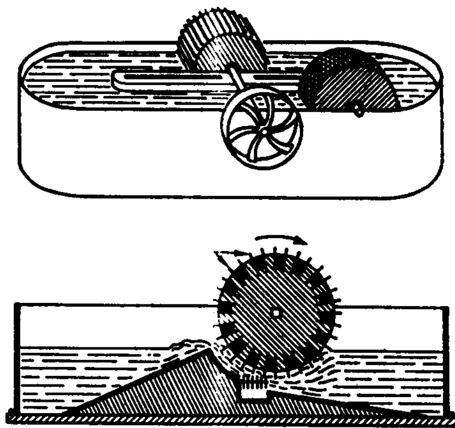
دستگاههای متعدد اتمام کار نیز در کارخانه‌های کاغذسازی، در همان زمان، بین سالهای ۱۸۵۰ ـ ۱۸۶۰ ـ از جمله دستگاههای: مهره‌کشی، گلاسه کردن، ابریشم‌نما کردن، پارشمن‌نما کردن، ته نقش انداز و غیره ـ فعال بودند.

خمیر کهنه پاره و خمیر سلولوز: مکانیکی کردن کامل تغییر شکل خمیر کاغذبه‌کاغذ نیاز روزافزون و مداومی به مواد خام دارد و در مرحلهٔ پیش از ساخت، انگیزهٔ تغییر شکل بنیادی روشهای ساخت خمیر بود. تنها مراجعه به منابع دیگر مواد خام کافی نیست و برای پرهیز از پیدایش یک تنگنای دیگر، باید برای متناسب کردن آهنگ تولید خمیر با سرعت مصرف آن بوسیلهٔ ماشین کاغذسازی چاره‌اندیشی کرد.

چنین می‌نماید که میل به سنت مدتها در ساخت خمیر کاغذ فرمان می‌رانده است. بویژه کار ژنده کردن پارچه‌ها با دست، لجوجانه بروش مکانیکی آن برتری داده می‌شد. درحالی‌که در سالهای ۱۸۶۰ ـ ۱۸۷۰ کارخانه‌هایی از قیچیهای مکانیکی استفاده می‌کردند و برای حذف دگمه‌ها، قلابها و دیگر اشیاء سخت، موافق جدا کردن جمعی آنها بودند که پس از رقیق کردن زیاد و ظرف‌به‌ظرف کردن انجام می‌شد، شماری از کاغذسازان کار ژنده کردن پارچه را محتاطانه با دست انجام می‌دادند.

با این‌همه، در عملیات دیگر که برای گذشتن از خیسانیدن تا مرحلهٔ تهیهٔ نیمه خمیر، و بعد، مرحلهٔ خمیر، آن‌همه متعدد بود در طول دو یا سه دهه از نوعی مکانیزاسیون بسیار پیشرفته استفاده می‌کردند. در مرحلهٔ خیسانیدن، به‌جای لگن، از تجهیزات استوانه‌ای یا کروی گردان استفاده شد. وان ژنده‌سازی پارچه، بسیار آسان تکمیل شد، همچنانکه وان رنگبری هیچ‌گونه تغییر شکل اساسی را متحمل نشد (شکل ۳۸). برای چکه‌کشی، کاربرد تدریجی پرسهای مکانیکی و دستگاههای نمگیر آغاز شد. نیمه‌خمیرها درگاز کلر یا درکرور کلسیم بیرنگ شدند. شست‌وشو و پاکسازی که در مرحلهٔ نیمه‌خمیر انجام می‌گرفتند، در همان راستا، با وسایلی که دیگر می‌توان آنها را پیشرفته نامید عملی شدند. بدین‌ترتیب، جز در کار اولیهٔ ژنده‌سازی پارچه، که در مورد آن کار دستی، ظاهراً یک شرط اساسی برای ساختن کاغذ خوب بود، تولید کاغذ از تکه‌های پارچه به درجه‌ای از مکانیزاسیون دست یافت که امکان عمل‌آوردن مقدار هنگفتی مواد جانشینی در همان ایامی که ناگزیر از استفاده از مواد دیگری بودند، فراهم آمد.

نخستین مواد جانشینی کهنه‌پاره که در سال ۱۸۵۰ به‌کار گرفته شدند حلفا، کنف، حصیر، و کاه بودند؛ اما تنها کاه، منبع نسبتاً غنی سلولوز بود. عملیات مقدماتی که بعضی از آنها با دست انجام می‌گرفتند، نیازی به وسایل خاص نداشتند، در آن زمان با دستگاه کاه‌خردکن و دستگاه الک آشنا بودند. دستگاههای خیس‌کنندهٔ ثابت یا گردان که با بخار آب گرم می‌شدند، به‌آسانی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. شست‌وشوکنندهٔ گردان، که دارای یک ردیف الکهای مخروطی بود که در بالای دیگ شست‌وشو، به‌طور افقی می‌گردیدند، با چند دستکاری از استوانه‌های سرندکاری که در



شکل ۳۸.وان ژنده‌سازی و پاکسازی پیوستهٔ خمیر کاغذسازی.
دیگ با طول دو متر. استوانهٔ با تیغه‌های برنده‌ای که دربرابر یک صفحهٔ ثابت با تیغه‌های برنده می‌گردد. در شکل بالا، در سمت راست، بشکه پاکسازی آب را خالی و خمیر را نگاه می‌دارد.

صنایع دیگر کاربرد داشتند، اقتباس شده بود. عملیات با دستگاه نمگیر پایان می‌گرفت. ماشین پاکسازی خمیر تفاوتی با آسیاهای غله، جز در مورد اندازهٔ هر دو ماسه‌سنگ نداشت. سرانجام برای پاکسازی از وانهای معمولی استفاده شد. همهٔ این روشهای تغییر شکل کاه به خمیر کاغذ، از اختراعی گرفته شده بود که در سال ۱۸۵۴ آقای ملیه[1] به ثبت رسانیده بود، درحالی‌که آزمایشها از سی یا چهل سال پیش، کم‌وبیش گاه‌گاهی انجام می‌شدند؛ تصرفات شیمیایی تفاوتی از عمل آوردن کهنه پارچه نداشتند: شبست‌وشو در سود، بیرنگ کردن کلرور کلسیم.

حدود سال ۱۸۹۰ عملیات بیرنگ کردن در دیگی که در آن با روش الکترولیز، کلرور سدیم و گاز کلر تولید می‌شد، آغاز گردید. بدین‌ترتیب در محلول، هیپوکلریت تشکیل می‌شود. انواع گوناگونی از وسایل برای بیرنگ‌سازی ساخته شدند که در اساس، یک ظرف الکترولیز با خانه‌های جنب یکدیگر بود که در یک وان بیرنگ‌سازی، که برای تأمین گردش مایع، آن را دستکاری کرده بودند، گذاشته می‌شد. این روش طبعاً با خمیر کهنه‌پاره‌ها جور بود و منطقاً از همان زمان پیدایش برای بیرنگ‌سازی خمیر چوب به‌کار گرفته می‌شد.

چوب: کاه جای خود را به سلولوز چوب واگذاشت، این جانشینی لااقل پس از پنجاه سال عملی شد. چوب از آغاز سدهٔ نوزدهم به یک مادهٔ صنعتی تبدیل شده بود که متحمل عملیات گوناگون

1. Mellier

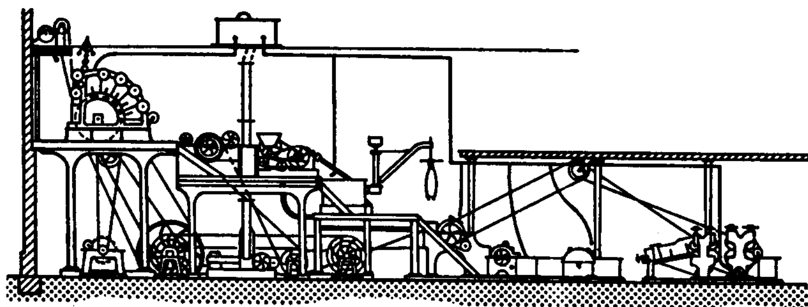
می‌شد. ساخت سنتی زغال چوب در کوره‌های سرباز، رفته‌رفته جای خود را به تقطیر در ظرف سربسته داد تا فراورده‌های گوناگون تصعیدی که صنایع مختلف به‌طور روزافزونی خواهان آنها می‌شدند ـ الکل متیلیک، اسید استیک، استون و قطران گردآوری شوند.

از سوی دیگر، پوست چوب بریده شده را می‌سوزانیدند تا سخت‌تر و ناپوسیدنی گردد. از یک شعلهٔ گاز روشنایی یا سوخت روغنهای سنگین تقطیر زغال‌سنگ برای این کار استفاده می‌شد. این کار در کارخانه‌های کشتی‌سازی رواج داشت تا چوبهای مخصوص کشتی و نیز چوبهای ویژهٔ کارگاههای تراورس‌سازی راه‌آهن (که قبلاً آنها را با سولفات مس آغشته می‌کردند)، تیرهای تلگراف و بالاخره وسایل کشاورزی را، فسادناپذیر سازند. حدود سال ۱۸۶۰ بود که حتی از خاک ارهٔ به‌هم چسبیده برای قالبگیری یا ساخت اشیاء تراشکاری‌شونده استفاده کردند.

این گسترش روشهای عمل‌آوردن شیمیایی چوب نمی‌توانست انگیزهٔ راههای دیگر کاربرد نباشد. در سال ۱۸۴۰ آقای کلر، که یک بافندهٔ ساکسونی بود، روشی را برای رشته‌رشته کردن ماشینی چوب با دستگاه اره در جریانی از آب به‌ثبت برساند. با این حال، تجهیزات کامل برای استفادهٔ صنعتی این روش، تنها بیست سال بعد بوسیلهٔ سازنده‌ای به‌نام ولتر[1] عملی شد (شکل ۳۹). این دستگاه برای این طرح شده بود که مادهٔ مورد عمل پیاپی همهٔ عملیات را برای عبور پیوسته از یک دستگاه، به دستگاه دیگر، از مرحلهٔ رشته‌رشته کردن تا پرس خمیر به‌هنگام عبور از تمیزکننده، صاف‌کننده و یک باتری از بشکه‌های شوینده و سرندها تحمل کند. با این‌همه، نتایج کار در آغاز زیاد نویدبخش ارزیابی نشد. اتلاف چوب ۵۰٪، مصرف زیاد انرژی برای تهیهٔ مقدار نسبتاً کم ۵۰۰ کیلوگرم در روز، و آرد چوبی که جز برای ساختن کاغذ نامرغوب که پس از مدت کوتاهی زرد می‌شود، مصرفی نداشت. اصلاحات پیاپی، از آن جمله، گذرانیدن از اتوکلاو، سبب ماندگاری این روش شد که خمیر خاص تهیهٔ کاغذ روزنامه را در دوره‌ای که روزنامه‌ها با تیراژهای زیاد، در سایهٔ ماشینهای لاینوتایپ (سطر ریز) و روتاتیو چاپ می‌شدند، تأمین می‌کرد. این خمیر مکانیکی نیز در مخلوط با خمیرهای کهنه‌پاره به‌کار گرفته می‌شد.

عمل آوردن شیمیایی چوب در دوره‌ای آغاز شد که رشته‌رشته کردن با دستگاه ایجاد شده بود. روشهای گوناگونی همزمان به‌کار گرفته شدند: شست‌وشوی تحت فشار با سود، که مستقیماً از عمل آوردن کاه اقتباس شده بود، اما، میزان فشار و نسبت سود آن را بالا برده بودند؛ شست‌وشوی با اسیدهای معدنی (سولفوریک، کلریدریک یا تیزاب). روش اخیر نتایج بدی داشت و بیدرنگ کنار گذاشته شد. بعدها، در سالهای ۱۸۸۰، از اسید سولفورو، نخست به‌شکل سولفیت کلسیم

1. Woelter



شکل ۳۹.دستگاه رشته‌رشته کردن چوب، ساخت ولتر.
سمت چپ و پایین، ارهٔ چوب‌بری و بالابر. سمت راست اره، محور حرکت‌دهندهٔ دستگاه با یک چرخاب، بعد، تلمبه‌ای که آب را به بام می‌رساند. در بالا و از چپ به راست و به طرف پایین: دستگاه رشته‌رشته‌ساز چوب، تمیزکنندهٔ اول، تصفیه‌کننده (دیگ گرد در مرکز، که پهلوی آن جراثقال دستی برای حرکت دادن دستگاه اره است). به طرف راست، دستگاه تقسیم‌کنندهٔ خمیر به نسبت ریزی آنها، گروه بشکه‌های فشاردهنده و در انتهای خط، صافی فشاری.

استفاده شد. ابتکارهای فردی و نیز روشهایی که بدون هیچ‌گونه نوآوری مهمی، بسرعت به‌کار گرفته می‌شدند، فراوان بودند. خمیر شیمیایی که از چوب کاج، درخت غان و تبریزی که در بی‌سولفیت به‌دست می‌آمد سرانجام نتایج مشابهی با خمیر کهنه پاره به‌دست آورد. و علاوه‌بر کاربرد عمومی در کاغذسازی، منبعی از سلولوز مرغوب شد.

نیتروژندهی به سلولوز: در اواخر سدهٔ نوزدهم، همهٔ شرایط لازم برای اینکه روشهای گوناگون استخراج سلولوز، مبانی صنعت مهمی را تشکیل دهند فراهم آمده بودند. نه‌تنها وسایل این کار ایجاد شده بود، بلکه بازار هم آماده بود. علاوه‌بر تقاضاهای روزافزون کاغذ و مقوا از هر نوع، کاربرد مشتقات نیتروژندار، برای تولید مواد انفجاری، الیاف مصنوعی مواد پلاستیک و فیلمهای عکاسی هم درکار بودند.

شیمیدان اهل بال، آقای شونباین در سال ۱۸۴۵ اعلام کرد که توانسته است با عمل آوردن پنبه تحت تأثیر مخلوطی از اسید نیتریک و اسید سولفوریک نوعی مادهٔ منفجره بسازد که آن‌طور که آنسلم پاین نوشته است «در محافل دانشمندان و جهان سیاست غوغایی برپا کرد».

طبیعی است که کشف یک مادهٔ منفجرهٔ جدید، با ساختی چنین آسان، توجه جهان سیاست را باید به خود جلب کند. با وجود کوششهایی که از یک سدهٔ پیش شروع شده بود و علی‌رغم

پیشرفتهای شیمی، تولید شوره همیشه محدود مانده بود. برداشت شورهٔ طبیعی، هنوز تنها منبع نیترات پتاسیم بود که همهٔ تولید مواد منفجره با کمک آن انجام می‌گرفت. تنها در سالهای ۱۸۶۰، زمانی‌که رگه‌های نیترات سدیم شیلی وکلرور پتاسیم ناحیهٔ اشتاسفورت[۱] مورد بهره‌برداری قرارگرفت، تبدیل نمک سدیم به شوره را آغاز کردند. نخستین ساخت شوره با این روش در ناحیهٔ پروس، در زمان جنگ کریمه (۱۸۵۴ ـ ۱۸۵۵) شروع شد تا جانشین شوره وارداتی از روسیه شود. اما این روش، دشوار بود و جهان سیاست دلبستگی خود را به تولید فراورده‌های نیتروژندار حفظ کرده بود.

دربارهٔ دانشمندان می‌توان گفت که شمار فراوانی از آنها از ۱۵ سال پیش، در ۱۸۴۵، به راهنمایی استنباطها و با کمک وسایل موجود در آن زمان، درکار آزمایش تأثیر همهٔ عوامل شیمیایی موجود روی همهٔ فراورده‌های طبیعی که با آنها برخورد می‌کردند، بویژه تأثیر اسید نیتریک روی چوب، کاغذ و پارچه‌ها بودند. بعضی از آنان، مثلاً آقای براکونو، شیمیدان اهل نانسی فراورده‌های نیتروژنداری، گزیلوئیدین، کاغذهای ازتی، تهیه کرد که ترکیب و خواص آن مورد بررسی برخی از همکاران وی، ازجمله آقایان: پلوز[۲] و پوانسو[۳]، و پاین قرار گرفت. نیتروسلولوز ساختهٔ شونباین در محیطی کاملاً آماده برای افزایش دنباله‌هایی بدان فرو افتاد. درواقع شیمیدانها بی‌درنگ به همانندی ساختار شیمیایی پنبهٔ باروتی با کاغذ ازتی پی‌بردند.

پنبهٔ باروتی: شیمیدان اهل بال و همکار وی آقای بوتژه[۴] با به‌کارگرفتن مخلوط سولفو نیتریک، روشی کارآمدتر از تأثیر تنهای اسید نیتریک را پیشنهاد کردند. شیمیدانهای متعددی این روش تهیه را با کوشش برای تغییر شرایط آن دنبال کردند. فراورده‌های بسیار گوناگونی بی‌درنگ به بازار روانه شدند و با نامهای مختلفی پیروکسام[۵]، پیروکسیل[۶]، پیروکسیلین[۷]، و فولمی ـ کوتون[۸] شناخته شدند. فراوردهٔ نخست، یک مشتق نیتروژندار نشاسته بود و فراورده‌های بعدی از مشتقات سلولوز. سرانجام نام پنبهٔ باروتی در فرانسه غالب آمد و در انگلستان آن را *guncotton* نامیدند. در مورد نیتروسلولوز باید گفت که بسیار دیر به‌کار گرفته شد و در اواخر سدهٔ نوزدهم از سلولوز به‌دست آمده از چوب به کمک بی‌سولفیت برای تهیهٔ آن استفاده می‌شد.

طی چند دهه پس ازکارهای شونباین، این ترکیب نیتروژندار، صرفاً از پنبه بود زیرا می‌دانستند که رشته‌های کوتاه (کُرک)، سلولوزهای تقریباً خالص هستند. بحثها دربارهٔ ترکیب مشتقات گوناگون

۱. Stassfurt: ناحیه‌ای در مشرق آلمان، که دارای معادن پتاس و نمک است.ـم.

۲. Pelouze تئوفیل ژول ۱۸۰۷ـ۱۸۶۷ ، شیمیدان فرانسوی و همکار گی‌لوساک.ـم.

۳. Poinsot لویی ۱۷۷۷ـ۱۸۵۹ ریاضیدان فرانسوی.ـم.

4. Boetger 5. Pyroxam 6. Pyroxyle 7. Pyroxyline 8. Fulmi-coton

نیتروژندار، طولانی و بسیار مبهم بودند. سرانجام، نوعی زبان مشترک برای کارشناسان، با در نظر گرفتن مقدار نیتروژن تثبیت شده و حلالیت آن در مخلوطی از الکل و اترسولفوریک تصویب شد. شیمیدانها بخوبی فهمیدند که این فراورده‌های گوناگون در واقع آمیزه‌ای از مشتقات نیتروژندار هستند که شناسایی آن تا زمانی‌که ساختار سلولوز ناشناس مانده باشد دشوار است.

به‌دنبال نخستین مسرتها، نوعی احتیاط ترس‌آور پدید آمد که علت آن چند انفجار کارگاه بود. در سال ۱۸۶۵ آقای ف. ا. ایبل[1] شیمیدان انگلیسی راهی یافت که بر اثر آن ترکش آسان نیتروسلولوزها کاهش می‌یافت. آقای ایبل نیتروسلولوز را در پایان ساخت از وان خمیر کاغذ می‌گذرانید تا این مادهٔ نیتروژندار به خمیر تغییر شکل دهد، آن‌گاه این خمیر را در (پرس هیدرولیک) تحت فشار قرار می‌داد. با این‌حال، انفجارها، بویژه در مرحله خشکاندن، ادامه داشتند. پس از مدت زیادی فهمیدند که جریان هوای گرم نوعی بار الکتروستاتیکی ایجاد می‌کند که می‌تواند با کمترین حالت تخلیه، مانند چاشنی عمل کند.

بنابراین، به‌کاربرد پنبهٔ باروتی در ترکانیدن سنگهای معدن بسنده کردند. در زمان جنگ انفصال، به‌عنوان مادهٔ انفجاری نظامی به آن دل بستند، اما در اسلحهٔ گرم، به عنوان مین، و سپس برای مهمات اژدرها آن را به‌کار بردند. در سال ۱۸۶۴ آقای ویسی مهندس باروتسازی فرانسوی، نخستین باروت بیدود را ساخت که آن را باروت B نامیدند. اما تنها ۲۰ یا ۲۵ سال بعد بود که باروتهای بالیستیکی با پایهٔ نیتروسلولوز به‌طور کامل جانشین باروت سنتی سیاه شدند.

نیتروگلیسرین: این تحول در ساخت مواد منفجره، در گسترش واکنشهای نیتروژندار کردن مواد آلی دیگر، نخست گلیسرین و بعد هیدروکربنهای بنزنی مؤثر افتاد.

خطرهای نیتروگلیسرین را، تنها پس از ۲۰ سال، در همان دورانی که برای بی‌خطر کردن نیتروسلولوز می‌کوشیدند توانستند برطرف کنند. آقای آسکانیو سوبررو شیمیدان ایتالیایی که در پاریس در آزمایشگاه پلوزکار می‌کرد توانست نخستین گلیسرین نیتروژندار شده را در سال ۱۸۴۶ تهیه کند. چندی نگذشت که تکرار این روش، به ساخت فراورده دیگری انجامید که آن‌هم به‌نوبهٔ خود نامهای متعددی یافت: روغن فولمینات، نیترولئوم، تری‌نیترین، پیروگلیسرین، گلونوئین و ... نیتروگلیسرین در آغاز در داروسازی به‌کار گرفته شد، گرچه به‌طور بسیار تصادفی. شیمیدانها نخست به بررسی ترکیب آن پرداختند، که شیمیدان انگلیسی به‌نام ویلیامسون آن را معین کرد؛ همچنین به تحقیق دربارهٔ خواص آن مشغول شدند. حساسیت نیتروگلیسرین به ضربه، در آغازکاربرد آن را به‌عنوان یک مادهٔ منفجره ممنوع کرد. پدر آقای آلفرد نوبل، مهندس پطرزبورگ نتوانست از آن در جنگ

۱. Abel، فردریک اوگوستوس (۱۸۲۷ـ۱۹۰۲): شیمیدان انگلیسی

کریمه به سود ارتش روسیه استفاده کند. خود آلفرد نوبل که در سال ۱۸۵۹ به سوئد بازگشت از مغز مبتکر خود برای به‌کارگرفتن این مادهٔ منفجرهٔ جدید کمک گرفت. یکی از نخستین اختراعات به ثبت رسیدهٔ وی در سال ۱۸۶۴ مربوط به استفاده از نیتروگلیسرین به‌عنوان مادهٔ منفجره است. وی از این سال ساخت و فروش آن را شروع کرد. انفجارهای متعدد قربانیانی در کارگاهها و مخازن برجای گذاشت که برادر خود آلفرد نوبل در ۱۸۶۴ از جملهٔ آنان بود. با وجود احتیاطهای فراوان این معاصران، مخترع سوئدی کارهای خود را دنبال کرد و در ۱۸۶۶ با قابل جذب گردانیدن این فراوردهٔ غلیظ روغنی بوسیلهٔ نگهدارهای سیلیسی و متخلخل از خاک رس خشک وگرد شده یا کیزلگور توانست نیتروگلیسرین را تثبیت کند. نیتروگلیسرین که کاربرد بسیار مطمئنی یافته و بدین‌ترتیب به دینامیت تبدیل شده بود، با موفقیت سومی روبه‌رو شد. نوبل در پوشش امتیازهای خود، شعبات و کارخانه‌هایی در همهٔ کشورهای صنعتی تأسیس کرد. این زمانی بود که شبکه‌های راه‌آهن در مناطق کوهستانی اروپا و امریکای شمالی تشکیل می‌شد؛ کاری که بسیار زمانگیر و پرهزینه بود و چنانچه مقاطعه‌کار چاشنیهای دینامیت در اختیار نداشت بعضی از قسمتهای آن احتمالاً ساخته نمی‌شد.

تولید صنعتی نیتروگلیسرین در تبلیغ نیتروسلولوز مؤثر افتاد. در سالهای پس از اختراع دینامیت، نوبل که نیتروسلولوز را هم ساخته بود آمیزه‌های گوناگونی از هر دو فراورده را آزمایش کرد و در ۱۸۷۵ به ساخت یک ردیف تمام مواد منفجرهٔ ژلاتینی توفیق یافت ـ موادی که می‌شد آنها را با اطمینان در سلاحهای گرم و نیز در مینها و کارهای عمومی به‌کار برد.

شیمی مواد منفجره: طی دو دههٔ پایانی سدهٔ نوزدهم، برای تولید مواد منفجرهٔ جدید، بررسیها، دامنهٔ وسیعی گرفت. اختراع چاشنی فولمینات به توسط نوبل در ۱۸۶۷ و نیز اختراع قدیمتر فتیلهٔ انفجار که طناب بیکفورد نامیده می‌شد و می‌توانست آتش را درکمال امنیت از فاصله انتقال دهد کار با مواد انفجاری را بی‌خطر کردند. پیدایش چاشنی برقی با قرقرهٔ القا، آتش کردن فوری دینامیت را ممکن ساخت.

شیمی مواد انفجاری رشتهٔ تازه‌ای شد و در سالهای ۱۸۹۰ پیشرفت سریعی کرد. روش نیتروژندهی با آمیزهٔ سولفونیتریک، به‌طور سیستماتیک روی ترکیبات آلی بسیار گوناگون، نشاسته، قند، و ملاس انجام می‌گرفت، اما بویژه روی ترکیباتی عملی می‌شد که یک هستهٔ بنزنی داشتند: بنزن، تولوئن، نفتالین و مشتقات آنها، آمینها و فنولها. بدین‌ترتیب، دیده می‌شود که طی چند سال انبوهی از فراورده‌های نیتروژندار، به‌طورکلی سه نیتروژنی ساخته شدند که سازندگان آنها برای تصویب کمیسیونهای دولتی مسؤول در هر کشور که بر کار تولید مواد منفجره مراقبت و فعالیت داشتند

می‌کوشیدند. از میان نسل مواد منفجرهٔ این دوران، ترکیب تری‌نیتروفنول از مدتها پیش با نام اسید پیکریک شهرت داشت، که جملگی یا بخشی از آن در تهیهٔ ترکیب لیدیت[1] در انگلستان مصرف می‌شد، این ترکیب در فرانسه به ملینیت[2] شهرت داشت. توجه به تری‌نیتروتولوئن از سال ۱۸۹۴ بسیار زیاد شد. در جریان جنگ جهانی اول و نیز در جنگ جهانی دوم با وجود پیشرفتهای انجام شده در رشتهٔ شیمی مواد منفجره بین این دو جنگ، از اعتبار آن کاسته نشد.

کارشناسان در اواخر این سده در هنر اتصال دادن فراورده‌های بنیادی برای تهیهٔ باروتهای بیدود و مواد انفجاری بدون خطر، استاد شده بودند. باروتهای بیدود ویژهٔ اسلحه گرم بودند. آنها را یا با نیتروسلولوز خالص، مانند باروت B که در فرانسه ساخته می‌شد، یا با آمیزه‌ای از نیتروگلیسرین و نیتروسلولوز، مانند ترکیب بالیستیت[3] نوبل یا کوردیت[4] انگلیس و بالاخره یا با آمیزهٔ نیتروسلولوز و نیتروبنزن، مانند باروت *Du pont* امریکاییها می‌ساختند.

مواد انفجاری بدون خطر از حدود سال ۱۸۹۰ برای به‌کار گرفتن در معادن زغال‌سنگ مورد بررسی بودند. کمیسیونهای دولتی مأمور به‌اجرا درآوردن کارهایی شدند که امکان ساخت مواد منفجره‌ای را فراهم کند که به‌هنگام ترکش، کمترین گرما را ایجاد کنند تا از ضربه‌های آتشدمه (گریزو) و نیز ضربه‌های گرد و غبار پرهیز شود. ترکیب پایه‌ای مورد قبول، نیترات آمونیم بود. در آن هنگام به تهیهٔ آمیزه‌های گوناگونی از این جسم با ترکیبات مختلف، مواد چرب، صابون، پرمنگنات، نفتالین دست زدند. مشتقات نیتروژندار ردیف آروماتیک، در پایان کار به‌عنوان مواد کمکی زیاد به‌کار گرفته شدند. گرد Favier (۱۸۸۹ ـ ۱۸۹۰) در فرانسه بیش از بقیه به‌کار می‌رفت که مخلوطی از حدود ۹۰٪ نیترات آمونیم و مونو، بی، یا تری‌نیترونفتالین بود.

در مدتی حدود سی سال ۱۸۷۵ ـ ۱۹۰۵، رشتهٔ مواد منفجره گسترش چشمگیری داشت. نه تنها شیمی نیتروژندهی که آقایان شونباین و سوبررو، با فراهم کردن مبانی تکنیکی آن را پایه گذارده بودند بلکه خود زمانه با دست‌ودلبازی، ردیف تقریباً بی‌پایانی از فرصتهای مساعد برای تجربه کردن فراهم آورده بود. کارهای بزرگ دولتی محققاً رو به پیشرفت داشت، اما جنگ هم بی‌تأثیر نبود. از زمان جنگ کریمه تا آغاز جنگ جهانی اول عملاً یک یا چند جنگ، چه در اروپا، چه امریکای شمالی و جنوبی یا مرکزی و چه در آسیا پیوسته شعله‌ور بوده است. آن زمان که دولتهای بزرگ در جنگ با یکدیگر بودند، از این مواد تجربه‌اندوزی می‌کردند؛ و زمانی‌که جنگ در بالکان یا امریکای جنوبی شعله می‌کشید آنها از به آزمایش گذاردن سلاحهای جدید خود بوسیلهٔ این یا آن طرف ـ گاهی هم هر دو طرف جنگ ـ غفلت نمی‌کردند. مؤسسات بزرگ متالورژی هم همین

1. lyddite 2. mélinite 3. ballistite 4. cordite

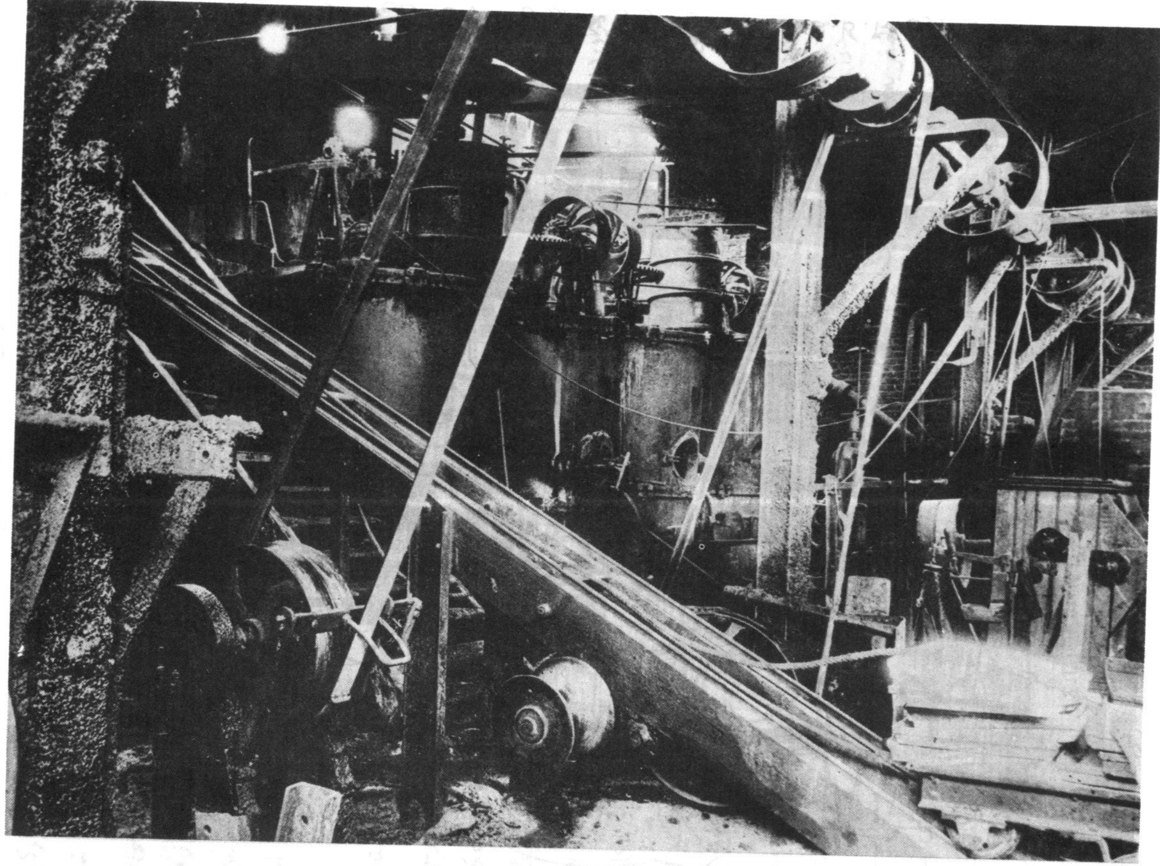
وسایل جنگی را تولید می‌کردند.

مبانی استقرار یافته از دهه‌های نخستین سدهٔ بیستم درپی این دوران طلایی، تا زمان جنگ جهانی دوم، تغییر شکل بنیادین نداشتند. اکسیژن مایع (رجوع کنید به صفحهٔ ۷۳۲) پس از کاربرد نخستین آن برای سوراخ کردن تونل زیمپلون[۱] در سال ۱۹۰۰، کاربرد چشمگیری نداشت. به‌کارگیری زیاد مواد منفجره با پایهٔ مشتقات نیتروژندار ترکیبات ردیف آروماتیک در زمان جنگ جهانی اول، هر دو طرف جنگ را بر آن داشت که واحدهای تولیدی اسید نیتریک، تولوئن، فنول و غیره را بر پایه‌های صنعتی جدید به‌کار اندازند. گرچه این تلاشها، پیش از ۱۹۱۸ در هیچ کشوری دستاوردی نداشت، دنبالهٔ آن به شکوفایی صنایع بزرگی انجامید که تا آن زمان پیشرفت زیادی نداشتند یا از روشهای سنتی استفاده می‌کردند که بزودی کنار گذاشته شدند.

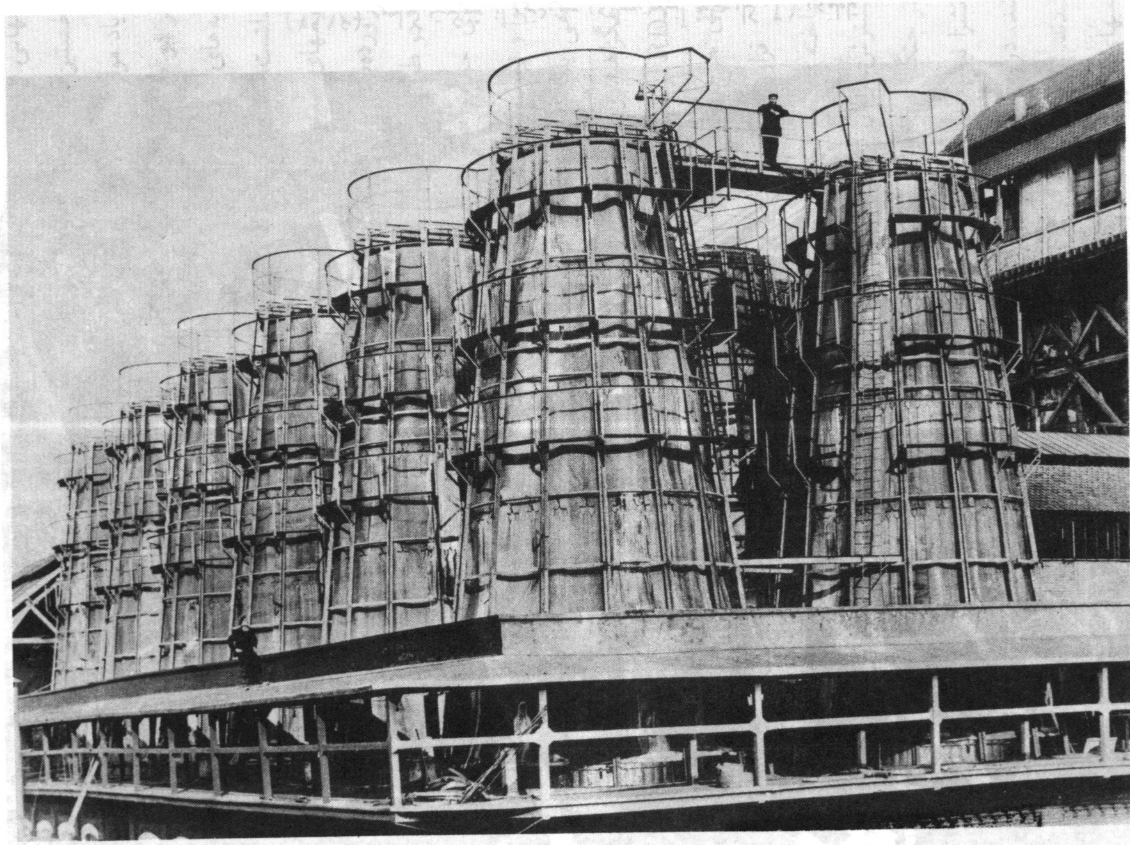
فراورده‌های شیمیایی با کاربرد جنگی: از همان آغاز جنگ جهانی دوم، یک ضرورت ناشناخته به دو طرف جنگ، بویژه انگلستان و ممالک متحدهٔ امریکا تحمیل شد: اقتصاد هیدروکربنهای لازم برای حرکت خودروهای موتوری. شیمیدانها به‌سوی مواد خام بسیار ساده و فراوان، یعنی : آب، هوا و زغال روی آوردند. انگلیسیان برای تهیهٔ دو مادهٔ منفجره قوی از طریق سنتز الکتروشیمیایی راهی یافتند: سیکلونیت، که در مدت جنگ بوسیلهٔ نیروی دریایی ممالک متحده با نام RDX (هگزاهیدروا، ۳، ۵، تری‌نیتروتری آزن) به‌کار گرفته شد و PETN (ترانیترات پنتا اریتریتول). ترکیب RDX از همهٔ مواد منفجرهٔ نسل خود قویتر بود و به‌شکل مخلوط با تری‌نیتروفنول و گرد آلومینیم برای خرج مینها و اژدرها به‌کار گرفته شد.

فراورده‌های گوناگون فراوانی در صنایع شیمیایی نظامی در هر دو جنگ درکشورهای مربوطه ساخته شدند. در اینجا از گازهای جنگی که برای ساخت آنها، تولید الکترولیزی کلر در فرانسه گسترش فراوان داشت و ترکیبات آن حیرت‌انگیز بود ذکری به‌عمل نمی‌آوریم. فراورده‌های دودکننده در جنگ جهانی اول ساخته شدند و پیش از جنگ جهانی دوم و نیز در طی آن تکثیر یافتند. مواد آتشزا نیز یک خانوادهٔ بسیار متنوع است. گرد آلومینیم در سال ۱۹۰۰ وارد ترکیب گردهای بیخطر شد. در طی سالهای ۱۹۳۰ فرمولهای گوناگونی از مخلوطهای گرد آلومینیم و منیزیم به‌کار گرفته شدند. یکی از آخرین پیشرفتها در این راه، بمبهای آتشزای ساخته شده از آلومینیم و اکسید آهن، و بمبهای منیزیمی بودند که امریکاییها از سال ۱۹۴۲ از آنها استفاده کردند. سرانجام برای آتشزایی، بمبهای بسیار سبک ساخت ژاپن از همه مؤثرتر بودند. امریکاییها نوعی بنزین ژله‌ای ساختند که با

۱. Simplon: گذرگاهی در آلپهای سویس که پیمون را به والو متصل می‌کند.ـم.



تابلوی ۲۱. کارخانهٔ آنیلین‌سازی سن‌دنی از شرکت کولمن (۱۹۱۶).



تابلوی ۲۲. کارخانهٔ ساخت اسید سولفوریک بروش اطاقهای سربی (حدود ۱۹۶۰).

ادغام یک صابون فلزی[1]، با نام بمب ناپالم[2] در زمان جنگ ویتنام بسیار به‌کار می‌بردند و بمباران مرکز توکیو با آن در ژانویهٔ ۱۹۴۵ بیش از ۲۰ کیلومترمربع را ویران ساخت.

کلودیون: زنجیر طولانی اختراعات مواد منفجرهٔ جدیدی به یاری روشهای نیتروژندار کردن ترکیبات آلی استخراجی از مواد طبیعی و بویژه از سلولوز ساخته شد. آقای گودن[3] شیمیدان متوجه شد که بعضی از نیتروسلولوزها دارای این خاصیت جالب هستند که در آمیزه‌ای از الکل ـ اتر حل می‌شوند و نوعی محلول شربتی می‌دهند. این محلول را آقای مینرد[4] امریکایی کلودیون نامید و پس از مدت کوتاهی کاربرد آن در پزشکی و جراحی معلوم شد. این محلول بسیار تبخیرشونده، می‌تواند بزودی روی زخم لایهٔ نازکی از نیتروسلولوز بسیار چسبنده تشکیل دهد. بعدها در سالهای ۱۸۵۰ امکان پدید آمدن آسان لایهٔ نازک، بازارهای دیگری برای آن به‌وجود آورد.

از مهم‌ترین آنها تهیهٔ صفحات حساس برای فیلمهای عکاسی است که نویسندگان متعددی به‌طور مبهم به آن اشاره کرده بودند، اما در پایان ۱۸۵۱ آقای اسکات آرچر[5] آن را دقیقاً شرح داد.

سلولوئید: تغییر مسیری که کلودیون ایجاد کرد، تنها مرحله‌ای نسبتاً کوتاه از مراحل اولیهٔ عمر عکاسی را تشکیل می‌دهد؛ مرحله‌ای که تا حدی اهمیت تاریخی دارد، زیرا انگیزه کاربردهای دیگر این فراورده شد ـ کاربردهایی که پایه‌گذار صنایع عظیم سدهٔ بیستم بودند. در سالهای ۱۸۶۵ ـ ۱۸۷۰ افکار تازه‌ای دربارهٔ استفاده از لزوجت (ویسکوزیته) و خاصیت سرعت خشک کردن کلودیون برای کاربرد آن به‌جای مواد دیگر، در ساخت گلهای مصنوعی و صحافی کتابها و تکثیر اشیاء زینتی قالبگیری شده، به میان آمد. محققی به‌نام آقای ج. و. هایت[6] امریکایی کاربرد یک ترکیب مصنوعی به‌جای یک مادهٔ طبیعی را بیشتر جلو برد و وسیلهٔ شکلپذیرکردن نیتروسلولوز را با مخلوط کردن آن با کامفر و الکل، یافت. مادهٔ اخیر تنها برای آسان کردن مخلوط شدن افزوده می‌شود، و کامفر به تنهایی نقش شکلپذیرکنندگی دارد. چنین فراورده‌ای در سال ۱۸۷۰ به‌نام سلولوئید روانهٔ بازار شد. این فراورده بیدرنگ موفقیت فراوان یافت. مخترع آن، آن را جانشین عاج برای ساخت گویهای بیلیارد معرفی کرد. سلولوئید در واقع هم، شاخ، فلس، ابونیت، گوتاپرکا را در همهٔ کارهای مهره و عروسک‌سازی قالبگیری شده، حذف کرد. این ماده که قالبگیری آن سهل و با کمی گرم کردن جوش می‌خورد و با ابزارهای سرد تراشیده می‌شد و به‌هنگام ساخت امکان رنگ کردن آن

---

۱. که از نمکهای سرب و آلومینیم و تعدادی فلز دیگر با اسیدهای چرب تهیه می‌شود و در رنگ‌کاری و تهیهٔ پارچه به‌کار می‌رود.ـم.

۲. napalm از دو واژهٔ naphtenic و palmitic acids ساخته شده است.ـم.

3. Gaudin 4. Maynard 5. Scott Archer 6. J.W.Hyatt

وجود داشت، با وجود آتشگیر بودن، کاربردهای بسیار فراوان یافت. با وجود پیدایش مواد پلاستیکی دیگر، گالالیت[۱] در ۱۸۹۷، باکلیت در ۱۹۰۷، پلوپا[۲] در ۱۹۱۸ و غیره، کاربرد سلولوئید با مکث بسیار زیاد و تنها در سالهای ۱۹۲۰ به کناری گذاشته شد. فرمولهای ساخت آن متعدد بودند. سلولوئید نمایندگی نوعی از مواد مصنوعی را دارد که شیمی صنعتی هنوز هم غالباً، لااقل تا میانهٔ سدهٔ بیستم، بدون اطلاع کافی از چگونگی واکنشهایی که در دیگها و همزنهایش انجام می‌گیرند، آنها را تولید می‌کند.

ابریشم مصنوعی: ردیف دیگری از فراورده‌های سلولوزی با نخستین کارهای ایلر ـ ل. شاردونه[۳] به بازار آمد. وی برای تهیهٔ ابریشم مصنوعی، کلودیون را با فشار از چرخ ابریشم‌کشی شیشه‌ای گذرانید و در انتهای آن، شکلی از یک رشتهٔ طویل و قابل پیچیدن دور قرقره، در آب به‌دست آورد. نتایج اولیهٔ کار آقای شاردونه در ۱۸۸۷ شناخته شد اما می‌بایست مخترع سالهای زیادی به تلخکامی زیاد بگذراند تا به یک تولید صنعتی دست یابد. وی تنها با کارهای تجربی توانست توفیق یابد: افزایش مواد الحاقی به کلودیون، نمکهای فلزی، بازهای آلی برای بهتر کردن شرایط نخ‌سازی و خواص فیزیکی نخ، روش دَلَمه‌ای کردن در انتهای چرخ ابریشم‌کشی، عمل آوردن نخ برای حذف لااقل جزیی نیتروژن از ابریشم مصنوعی.

آقای شاردونه توانست به نخهای مصنوعی خود، تا حد رضایتبخشی، لطافت ابریشم را بدهد، اما عیب عمدهٔ این نخها، با وجود کوششهای انجام‌شدهٔ وی و سازندگان متعدد دیگر، استعداد این نخها به تجزیهٔ تدریجی و آتشگیری آنها بود. شاردونه ضمن اقدامات خود، روشی را که ژوزف سوان برای ساخت رشته‌های کربنی ویژهٔ لامپهای برقی اولیه (۱۸۷۸ ـ ۱۸۸۰) اتخاذ کرد، تکرار نمود. نخ نیتروسلولوز را با سولفور آمونیم عمل آورد تا با سلولوز پوشیده شود. آقای سوان نخ سلولوزی با ضخامت کاملاً دقیق را در معرض نوعی زغالی کردن تحت کنترل قرار داد تا تبدیل به افروزه شود. اما احیای قلیایی سلولوز، نوعی نخ بافندگی نامرغوب ایجاد می‌کرد. ناچار به روشهای کمتر کارآمد روی آوردند که آتشگیری نخ را مقدار کمتری کاهش می‌داد. به گفتهٔ آقای شروود تیلور، ابریشم مصنوعی را خود کارگران سازندهٔ آن «ابریشم مادر زن» می‌نامند، و این به‌علت ملالی است که شخصی که لباسی از آن را هدیه گرفته است، احساس می‌کند.

در سالهای نخستین، اشکال دیگری درکار آمد که شاید هدف تبلیغی داشته است و آن، هزینهٔ گزاف تولید بود. عالیترین پنبه را برای اینکه ابریشم خوبی داشته باشند نیتروژنی می‌کردند. بهای مواد الحاقی، مالیات زیاد که به الکل بسته شده بود و عمل آوردن نهایی این فراورده، سنگین

1. Galalithe 2. Polopas 3. Hilaire-L. Chardonnet

بود. ابریشم مصنوعی را گرانتر از ابریشم طبیعی می‌فروختند. اما گویا این اشکال مانع فروش آن نمی‌شد. در سال ۱۸۹۵ دولت فرانسه جوایزی را برای پرورش‌دهندگان کرم ابریشم تعیین کرد تا زیان رقابت ابریشم مصنوعی جبران شود. این وضع، مردم را گمراه کرد. در آغاز سال ۱۸۹۹ تقاضا چنان بالا رفت که سازندگان از عهدهٔ تأمین آن برنیامدند. بهای بعضی اقلام مثلاً ملیله و یراق با ابریشم مصنوعی، به سه برابر نوع طبیعی آن رسید؛ اما بعداً وضع یکباره معکوس شد.

سلولوزهای قلیایی: درست است که این تولید منظماً افزایش یافت، اما روشهای کم‌خطرتری با روشهای شاردونه رقیب شدند. مهمترین روشها در این زمان، تأثیر دادن محلولهای قلیایی روی سلولوز بود که نیم سده پیش از آن در ۱۸۴۴ آقای جان مرسر[1] آن را به‌کار برده بود. محلول سود، به پنبه جلا می‌دهد و به استحکام آن می‌افزاید و قابلیت فوق‌العاده‌ای برای رنگ گرفتن در آن ایجاد می‌شود. مرسریزه کردن تا اواخر این سده، رونقی نداشت. توما[2] و پره و شیمیدانهای فرانسوی بودند که با یک ردیف اختراعاتی که در سالهای ۱۸۹۶ و ۱۸۹۸ در قسمت کرپ کردن پارچه به ثبت رسانیدند، کاربرد آن را توسعه دادند.

پیش از آنان در سال ۱۸۹۲ آقایان چارلز کراس[3] و ا. ج. بوان[4] وسیلهٔ رشته کردن سلولوز قلیایی محلول در سولفورکربن را، با گذرانیدن این محصول از یک محلول رقیق اسید سولفوریک در انتهای چرخ ریسمان‌کشی شناسانیده بودند. هزینهٔ تولید این فراورده در آغاز بسیار بالا بود زیرا از کُرک و سولفورکربن که هنوز گران بود برای ساخت آن استفاده می‌شد. ده یا پانزده سال بعد که برای تهیهٔ آن، سلولوز چوب و بی‌سولفیت را به‌کار بردند نخ ویسکوز رفته‌رفته جانشین ابریشم شاردونه شد.

از میان روشهای دیگری که در این دوره به‌کار گرفته شدند، تنها یکی از آنها، آن‌هم به‌شکل بسیار بی‌سروصدا، ماندگار شد و آن روشی بود که آقای پاولی در سال ۱۸۹۵ پیشنهاد کرد. این روش، از خاصیت کاملاً شناخته شده‌ای از سلولوز در آن زمان استفاده می‌کرد و آن حل شدن در مایع کوپر و آمونیاکال شوایتزر بود. نخ ویسکوز به‌هنگام خروج از چرخ از محلول اسید استیک گذرانیده، سپس کشیده و دور قرقره پیچیده می‌شد. مس و آمونیاک را به‌شکل استات بازیابی می‌کردند.

ازمجموع انواع سلولوزهای عمل‌آورده یا بازیابی شده در سال ۱۹۰۰، ابریشم شاردونه ۸۰٪ تولید جهانی الیاف مصنوعی را تشکیل می‌داد و ۲۰٪ مانده از ویسکوز و سلولوز کوپر و آمونیاکال بودند. بعدها در سالهای ۱۹۳۰ ویسکوز به‌طور کامل جانشین ابریشم شاردونه شد. در سال ۱۹۳۸ تولید الیاف سلولوزی بین ویسکوز (۸۲٪)، استاتها (۱۳٪) و بقیه، سلولوز کوپر و آمونیاکال تقسیم شد.

1. John Mercer 2. Thomas 3. Ch. Cross 4. E.J.Bevan

استاتهای سلولوز: ساخت استاتهای سلولوز بسیار دیر دارای اهمیت صنعتی شد. در واقع پس از کارهای شوتسنبرگر در سال ۱۸۶۹ بود که توانستند سلولوز را به استات تبدیل کنند که محلول بود. در ۱۸۹۰ آقای ویویه[1] بر پایه نیتروسلولوز این کار انجام داد و چهار سال بعد آقایان کراس و بوان که نخستین آزمایشها را برای به‌کار بردن گزانتات سلولوز در ساخت ویسکوز انجام می‌دادند توانستند این استات را مستقیماً به‌دست آورند. محصول آنها به مدت ده سال فاقد خاصیت شکل‌پذیری بود ـ چیزی که نیتروسلولوز را ممتاز می‌ساخت. نخستین کارخانه برای عملی کردن روشهای آنان در سال ۱۹۰۲ در آلمان تأسیس شد و به‌علت مشکلات فنی موجود در راه آن و نیز نخستین رونق ساخت ویسکوز در ۱۹۰۶، بسیار آهسته پیش رفت. تولید صنعتی استاتها، نخست متضمن تأسیس کارخانه‌ای برای تولید اسید استیک یخی (گلاسیال)، یعنی اسید بی‌آب، و نیز استون بود که به‌عنوان حلال به‌کار می‌رفت. اسید استیک صنعتی را در آن زمان از تقطیر چوب به‌دست می‌آوردند. حدود سال ۱۹۱۰ تقطیر شراب خام چغندر نیز به‌کار گرفته شد. تنها در سالهای ۱۹۲۰ بود که تهیهٔ صنعتی آن بروش سنتز بر پایهٔ استیلن آغاز شد. خود استون را از تقطیر خشک استات کلسیم به‌دست می‌آوردند. بنابراین، گرچه سلولوز چوب بسیار فراوان شده بود، مواد اولیهٔ دیگر، تا دورهٔ بعدی، بسختی به‌دست می‌آمدند.

بدین‌ترتیب، استات سلولوز، تنها توانست برای تهیهٔ فیلمها، استیل سلولوئید و ورنیها بازار مختصری پیدا کند. کمی پیش از جنگ جهانی اول، کاربرد نیتروسلولوز در فرانسه برای ساخت فیلمهای عکاسی ممنوع اعلام شد. اما این ممانعت، تنها پس از جنگ یعنی زمانی عملی شد که استاتهای سلولوز به مقادیر هنگفت و با بهای مناسبی وارد بازار شدند. در مدت جنگ، در واقع پژوهشهای فراوانی در همهٔ کشورها برای تهیهٔ ورنیهای ناتراوا، اشتعال‌ناپذیر و فاسدناشدنی برای پوشاندن پارچه‌ها و بالهای هواپیما انجام گرفت. استاتهای سلولوز به این نیازها دقیقاً پاسخ می‌دادند. شیمیدانها در کنترل واکنش استیلدار کردن سلولوز بوسیله آلدئید استیک، که خود آن با واکنش دادن کلرور استیل (که از آلدئید به‌دست می‌آمد) بر استات سدیم تهیه می‌شد، با کمک کاتالیزوری از اسید سولفوریک مهارت یافتند. اسید استیک به‌عنوان رقیق‌کننده لازم بود. هنوز از محدودهٔ نسبتاً تنگ منابع مواد خام خارج نشده بودند.

با این‌حال، در پاسخگویی به نیازهای جنگی، ساخت استاتهای سلولوز، طی دو سال آخرین جنگ بشدت افزوده شد. پس از پایان مخاصمات، تأسیسات صنعتی مهم، در این زمینه و نیز در زمینه‌های دیگر باقی ماندند. امکان استفاده از آنها در ساخت مواد پلاستیک و فیلمهای سلولوزی

1. Vivier

وجود داشت. دنبالهٔ فراورده‌ها، طی سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۳۰ به صنعتی کردن اسید استیک بر پایهٔ استیلن کشیده شد. در زمینهٔ مواد پلاستیکی، استیل ـ سلولوئیدها با نامهای متعدد تجارتی در همهٔ کشورها به فروش رسیده‌اند. در فرانسه، رایجترین نام رودوئید *rhodoid* است. آنها همیشه بر کلوئیدهای دارای پایهٔ نیتروسلولوزی، که دیگر بیش از ۲۵٪ تولید جهانی مواد پلاستیکی نیستند برتر شمرده شده‌اند ـ نسبتی که در سال ۱۹۱۳ برابر ۸۰٪ و در ۱۹۲۴ برابر ۵۰٪ بود. در این دوره مواد فنوپلاست، ۵۰٪ تولید جهانی را پوشانیده‌اند و استیل سلولوئیدها طی چند سال از ۲ تا ۳٪ به حدود ۱۲٪ تولید جهانی دست یافته‌اند.

گسترش صنایع فراورده‌های جانشینی بر پایهٔ سلولوز، روالی سریع و ممتد داشته است. این فراورده‌ها نه‌تنها یک فهرست طولانی از کاربردها را تقدیم داشته‌اند بلکه انگیزهٔ تغییر شکلهای اولیه و قطعی تکنیکهای تولید صنعتی نیز بوده‌اند. افزون بر اینها وجود آنها و کاربردشان رفته‌رفته انگیزهٔ به‌کارگیری مواد خامی بوده است که تا آن زمان مورد استفاده قرار نمی‌گرفتند. نخستین لغزش مهم، همان‌طورکه در صنعت مواد انفجاری دیده شد، در جایی اتفاق افتاد که عناصر دیگر تولیدی، جز سلولوز، به‌حساب گرفته شدند. این فرایند تحولی بعداً در دیگر صنایعی که بر پایهٔ تغییر شکلهای سلولوز، الیاف مصنوعی، و مواد پلاستیک قرار داشتند، برای تحریک پیدایش سنتزهای بزرگ آلی در شیمی صنعتی، در آستانهٔ جنگ جهانی دوم، به ظهور رسیدند.

۳

دانش و تکنیک شیمی

عمل آوردن فراورده‌های طبیعی، مانند سلولوز، سپس زغال‌سنگ، در آغاز با روشهای صرفاً آزمایشی انجام می‌گرفت. اما همه می‌دانند که تقطیر قطرانهای زغال‌سنگ در آزمایشگاه، سبب آشنایی شیمیدانها با ترکیبات گوناگونی شد که تا آن زمان ناشناخته بودند و برای شیمی آلی، تعدادی مبانی تجربی تهیه کرد که در نیم سده، از ۱۸۲۰ ـ ۱۸۷۰ قوانین اساسی شیمی کربن روی آنها مستقر شدند.

مشتقات بنزن: گفت‌وگو دربارهٔ ترکیب و ساختار مواد کربنی، طولانی بود و گاهی هم تند می‌شد. تنها پس از کارهای استانیسلائو کانیزارو و ککوله و بالاخره کوپر[1] بود که توافق روی مقدار اعداد اتمی (۱۸۵۰)، چهار والانسی بودن کربن(۱۸۷۵ ـ ۱۸۵۸) و ساختار حلقه‌ای شش‌گوشهٔ مولکول بنزن (۱۸۶۵) به‌عمل آمد و تحقیق صنعتی توانست بر دانش مطمئنی تکیه داشته باشد و موفقیتهای درخشانی کسب کند.

پیش از این دوران، تولید نخستین رنگهای مصنوعی به مقیاس صنعتی رسیده بود و انواعی از فراورده‌ها به بازار فرستاده می‌شدند که هنوز نمی‌شد آنها را فراورده‌های جانشینی نامید. آنها در

1. Couper

واقع جانشین رنگهای طبیعی شدند، که تهیه و کاربرد آنها طی سده‌ها، یکی از پایه‌های تکنیکهای شیمی سنتی بود.

نخستین خانوادهٔ رنگها را مشتقات بنزن و بویژه مشتقات نیتروژنی آن به‌وجود آوردند. بنزن که با تقطیر قطرانهای زغال‌سنگ به‌دست آمده بود، حدود سال ۱۸۴۰ از معروفترین هیدروکربنها بود و فاراده در سال ۱۸۲۵ آن‌را شناسانید. کارهای فراوانی روی مشتق آمیندار بنزن، انیلین، انجام شد و آقای فریچ[1] پس از آقای اونفردوربن[2] در سال ۱۸۴۱ با فعل‌وانفعال روی نیل (اندیگوی طبیعی) آن‌را تهیه کرد که در آن زمان تنها، شناخته شده بود ولی از فرمول آن چیزی نمی‌دانستند. دو سال بعد، آقای آوگوست ویلهلم فون هوفمان، شیمیدان آلمانی، که در انگلستان اقامت داشت بنوبهٔ خود آنیلین (نامی که فریچ روی آن گذاشته بود) را تهیه کرد. آقای هوفمان برای این کار، مشتق نیتروژندار بنزن را احیا کرده بود. روش هوفمان در تهیهٔ انیلین ارزانتر تمام می‌شد، اما چون این فراورده هنوز هیچ کاربردی نداشت، از محدودهٔ آزمایشگاه خارج نشد.

آقای هوفمان که در این زمان توانسته بود برای آمینها یک نظریهٔ کلی تنظیم کند به حل مسائل دیگری همت گماشت. وی بویژه یکی از دستیاران خود، آقای و. هـ. پرکین[3] را مأمور حل مسأله ترکیب هیدروکربن دیگری به نام آنتراسن کرد که از قطران زغال‌سنگ به‌دست می‌آمد. خود هوفمان روی کینین کار کرد که فرمول خام آن معلوم بود، اما وی می‌خواست روشی برای تولید مصنوعی آن بیابد.

آقای پرکین که در آغاز کار خود (۱۸۵۳) در آزمایشگاه هوفمان بیش از پانزده سال نداشت، با همان کارهای اولیه، آزموده شد. خودش به این مسأله دلبسته بود و به تحقیقات در آزمایشگاه کوچک خانگی خود ادامه می‌داد. وی در آغاز کوشید که آلیل‌تولویدین allyltoluidine را که ترکیب آمینه با فرمول خام $C_{۱۰}H_{۱۳}N$ بود، اکسید کند. این فرمول تقریباً از نظر وزنی برابر نصف فرمول کینین $C_{۲۲}H_{۲۴}N_{۲}O_{۲}$ (با حذف اکسیژن) بود. او که از فرمولهای گسترده، که بیست سال بعد مطرح شدند، اطلاعی نداشت، وسوسه شد که از هریک از دو مولکول یک هیدروژن بگیرد، بدین‌ترتیب، توانست با تثبیت دو اکسیژن، زمانی‌که آب تشکیل شد، آنها را به یکدیگر پیوند دهد.

رنگهای آنیلینی: این کوشش به جایی نرسید. پرکین کار خود را این‌بار با مادهٔ ساده‌تری، آنیلین، شروع کرد و ترکیب تیره جامدی به‌دست آمد. حال، آقای پرکین اندیشید که فراوردهٔ خود را در رنگرزی آزمایش کند و متوجه شد که توانسته است که رنگ قرمز عالی برای پارچه‌ها به‌دست آورد. وی بی‌درنگ برای یافتن روش ساخت صنعتی آن به‌کار پرداخت. او روش ارزان اختراعی آقای

1. Fritsche 2. Unverdorben 3. W.H.Perkin

بشان در ۱۸۵۳ را پذیرفت. در این روش نیتروبنزن، که با اثر گذاشتن مخلوط اسید نیتریک ـ اسید سولفوریک روی هیدروکربن به‌دست آمده است، با تحت تأثیر قراردادن اسید استیک روی سیم آهن، احیا می‌شود. این اختراع را در ۱۸۵۶ به ثبت رسانید و سال بعد که کارخانه خود را با کمک مالی خانواده‌اش تأسیس کرد، به تولید آن پرداخت.

کار برجستهٔ پرکین فوراً شهرت یافت. وی معاصران خود را شگفت‌زده و همکاران خود را تحریک کرده بود. کار وی بازتاب گسترده‌ای یافت. وی نه‌تنها یک صنعت تازه ایجاد کرده بود (که این‌را هرکس بزودی فهمید) بلکه به فراورده‌های متعددی که کاربرد آنها در صنعت، کم و یا هیچ بود ارزش اقتصادی تازه‌ای بخشید. از آن جمله باید نخست از بنزن و همرده‌های بالاتر از تولوئن، و نیز از مشتقات آمینه، از اسید استیک، اسید نیتریک، اسید کلریدریک و غیره نام برد.

رنگهای دیگری که برپایهٔ همین روش تهیه شدند بزودی شهرت یافتند. در فرانسه، ناتانسون[1] رنگ قرمز دیگری با حرارت دادن آنیلین با کلرورقلع به‌دست آورد. فراوردهٔ اولیه‌ای که روی آن عمل کرده بود مخلوطی دارای ترکیب نامشخص، با نسبت متغیری از آنیلین و تولوییدین‌ها بود. آقایان ورگن[2] از یکسوی و رنار ازسوی‌دیگر در سال ۱۸۵۹ ساخت صنعتی فراورده‌هایی را شروع کردند که اولی آن را به افتخار ناپلئون سوم، قرمز ماجنتا[3] نامید و دومی آن‌را، فوکسین fuchsine، که برابر نام رنار (روباه) در زبان آلمانی است.

تجربه‌گرایی: تکثیر رنگهای آنیلینی بدین‌طریق جز سالی چند دوام نیاورد. هر صنعتگر از روی نسخهٔ مخصوص خود عمل می‌کرد. تنوع مواد خام متناسب با روش تهیهٔ آنها بسیار گسترده بود و هرگز نتوانستند ترکیب شیمیایی دقیق آنها را مشخص سازند. مثلاً آنها بعدها دانستند که دو نوع تولوییدین وجود دارند: ارتو و پارا. آنان روشهای بسیار گوناگونی را برای تغییر دادن روشهای آماده‌سازی اولیهٔ رنگ، با استفاده از مهارتهای شخصی، به قصد تولید رنگهای تازه‌ای از آنیلین به کار گرفتند. نسبت فراورده‌های به‌کار رفته، مدت و دمای پخت، روش تغلیظ و تکمیل کاری این فراورده در همهٔ موارد طبق قواعد تجربی بود و هیچ‌گونه خصلت عمومی نداشتند. این قواعد را تا مدتها پس از اینکه اطلاعات علمی بدقت مشخص شدند باز رعایت می‌کردند. هنوز در سال ۱۹۰۳ هم کتاب مهم شیمی صنعتی نوشتهٔ آقایان واگنر و فیشر در چاپ شانزدهم خود به زبان آلمانی، در فصل مربوط به رنگهای مصنوعی، یک ردیف نسخه‌هایی از نوع زیر را آورده است:

1. Natanson 2. Verguin

۳. Magenta به ایتالیایی، ماجنتا، شهری در ایتالیای شمالی در ناحیهٔ لومباردی. در سال ۱۸۵۹، در این ناحیه، ناپلئون سوم ارتش اتریش را شکست داد. ـ م.

«در دیگ پخت رنگ مواد زیر ریخته می‌شود: ۷۰۰ کیلوگرم اسید ارسنیک (۷۵ درجهٔ بومه)، ۳۰۰ کیلوگرم اسید ارسنیک احیا شده (۷۵ درجهٔ بومه)، ۳۰۰ کیلوگرم آنیلین برای رنگ قرمز و ۲۰۰ کیلوگرم مواد فراری از تقطیرهای پیشین ... اینک اجاق را (از ساعت شش صبح) روشن می‌کنند و تا هفت ساعت (ساعت یک یا دو بعدازظهر) گرم کردن ادامه می‌یابد، آنگاه تقطیر آغاز می‌شود. حال حرارت را چنان تنظیم می‌کنند که در هر ساعت ده لیتر محصول تقطیر داشته باشیم. در پایان بیست ساعت، آتش را تندتر می‌کنند تا در هر ساعت بیست لیتر محصول تقطیر به‌دست آید. زمانی‌که محصول تقطیر به ۴۰۰ لیتر برسد، محلول تقطیرشونده، قوام یافته است ... برای اینکه لحظهٔ قطع عملیات دانسته شود، تجربیات زیادی لازم است ...» سپس یک ردیف عملیات ذکر می‌شود تا محلول تقطیرشونده از لحاظ استخراج فوکسین خام و خالص کردن آن آماده شود: «فوکسین خام، علاوه‌بر فوکسین، کریزانیلین، مووانیلین، ویولانیلین محتوی مواد دیگری هم هست که هنوز شناخته نشده‌اند.»

صفت رنگ با وجود نوپایی و داشتن ظاهر تکنیکی با پایهٔ عملی، چهل‌وپنج سال بعد از تولد ظاهراً هنوز از حال و هوای صابون‌پزی سنتی خارج نشده بود. این نسخه‌ها با داشتن خصلت تجربی، دستورکار نه‌تنها پیشه‌وران کوچک، بلکه دیگران هم بودند. این صنعت جدید که در انگلستان زاده شده بود پیشرفت واقعی خود را در آغاز دههٔ ۱۸۶۰ در آلمان یعنی در کشوری که پیش از جنگ جهانی اول، در این رشته در جهان پیشتاز بود داشته است.

با این وجود، درگامهای نخستین این صنعت، چند مفهوم ابتدایی مشخص شدند. این واقعیت که رنگهای آنیلینی باید به گروه تری فنیل‌متان و مشتقاتش وابسته باشند ظاهراً خدمت چندانی به‌کارهای آزمایشگاهی وکارگاهی نکرده است. اما مفهوم لوکوبازها[۱] برای جهتیابی وکاربرد رنگهای جدید دارای سودمندی فوریتری بود. صنعتگران در رنگرزیها فراورده‌های بیرنگ تهیه می‌کردند که با اکسید شدن روی نخ رنگی می‌شدند. این روش برای رنگرزها ناشناخته نبود، علاوه‌بر آن این کار را از سده‌ها پیش بانیل و پاستل نیز انجام می‌دادند. برای شیمی، این کاری ساده ـ گرچه غیرمنطقی ـ بود که فراورده‌های مصنوعی را با مهارتهای سنتی تکثیر کنند.

رنگهای دونیتروزنی: موفقیت سریع درکار تهیهٔ رنگهای آنیلینی، ردیف تازه‌ای از رنگها را موجب شد که برپایهٔ کاربرد ترکیبات گوناگون، بویژه فنولها و مشتقات آنها و نیز واکنشهایی که هنوز ناشناخته بودند ساخته می‌شدند.

---

۱. از واژهٔ یونانی leukos به معنای سفید یا بیرنگ، بخش بیرنگ مواد رنگی است؛ کاربینولهاAr_3COH یک لوکوباز است. ـ م.

نسل دوم رنگهایی مصنوعی از حدود سال ۱۸۶۰ پدیدار شد. این زمانی بود که آقای پیتر کریس[1] واکنش دونیتروژندارکردن را با ایجاد پیوند دوگانه‌ای میان دونیتروژنی که در هسته‌های بنزنی تثبیت شده‌اند، کشف کرد. ترکیب نخستین رنگهای دونیتروژنی، کمی بعد، با فرمول زیر نمایش داده شد: $C_6H_5-N=N-C_6H_5$ و اولین کروموفوری (مادهٔ رنگ‌ساز) بود که شناخته شد. یک هستهٔ ساده بنزنی را می‌توان با مشتقات، مثلاً فنولی هیدروکربنهای دیگر حلقوی و مشتقات آنها تعویض کرد. بدین‌ترتیب، در برابر گسترهٔ تازه‌ای از ترکیبات قرار گرفتند. که با الحاق گروههای اوکسوکرومی (رنگیار) به آنها، برای اینکه به رنگهای حقیقی تثبیت شونده روی نخها تبدیل شوند، دامنهٔ آنها باز هم گسترده‌تر شد.

کارهای آقای کریس دربارهٔ دی‌آزوها در سالهای ۱۸۵۸ ـ ۱۸۶۴ ادامه داشت. نخستین رنگ آزویی، قهوه‌ای فنیلن، قهوه‌ای بیسمارک را او با همکاری آقای کارو[2] در سال ۱۸۶۷ به‌دست آورد. فراورده‌های دیگری پس از مدت زیادی تهیه شدند. در سال ۱۸۷۶ آقای ویت[3] شروع به ساخت یک دی‌آمینو دی‌آزوبنزن $C_6H_5-N=N-C_6H_3-(NH_2)_2$ کریزوئیدین کرد که ویژهٔ رنگ زرد برای پنبه بود که با تانن (مازو) دندانه می‌شد. این نوع رنگهای مستقیم یا با دندانه افزایش یافتند. حدود سال ۱۸۸۰ آقای روسن[4]، شیمیدان فرانسوی، وسیلهٔ تهیه آنها را با نفتولها یافت. مفاهیم اصطلاحات auxochrome (رنگیار) و chromophore ماده رنگ‌ساز را ما مدیون آقای ویت در سال ۱۸۷۶ هستیم.

آقای آدولف فون بایر که بعدها با سنتز اندیگو، شهرت یافت راه پیدایش نسل سوم رنگهای مشتق از فنولهای گروه تری فنیل‌متان را با ساختن فنول فتالئین در سال ۱۸۷۲ گشود. چهار سال بعد، آقای هـ. کارو بنوبهٔ خود فلوئورسئین را به‌دست آورد که با مشتقات یددار و برم‌دار یا نیتروژندار آن ردیف ائوزین‌ها را تهیه کردند که رنگهای تابنده‌ای هستند که در ردیف بسیار موزونی در کمتر از ده‌سال به بازار آمدند.

شکوفایی صنعت رنگ: شیمیدانها که در این دوران از پیکربندی (کنفیگوراسیون) مولکولهای ترکیبات آروماتیک اطلاع بیشتری یافته بودند در کار جفت کردن و وارد کردن عناصر تازه‌ای، مثلاً گوگرد، با بلود و متیلن، بازهم ابتکار آقای کارو، به آنها مهارت بسیار زیادی یافته بودند. در واقع نخستین رنگ گوگرددار به شکل بسیار تجربی از پهنهٔ شیمی بیرون داده شد، پهنه‌ای که در زمینه‌های دیگری نیز، مثلاً عکاسی، فعالیت بسیار تب‌آلود اما خیلی کم بهره داشت. در سال ۱۸۷۴ دو

1. Peter Criess 2. Caro 3. Witt 4. Roussin

صنعتگر از لاوال، دم اره چوب، کاغذ پاره با گوگرد و یک قلیا را با یکدیگر مخلوط کردند و از بخت‌خوش از این مخلوط، رنگ قهوه‌ای به‌دست آوردند که بدون دندانه، نخها را رنگ می‌کرد. این رنگ با نام قهوه‌ای لاوال به بازار آمد.

گرچه این رنگ به علت بوی بد آن مورد علاقهٔ رنگرزان نبود، اما پانزده سال بعد، جهت تحقیقات شیمیدانها را برای تهیهٔ رنگهای قهوه‌ای دارای همان خاصیت رنگرزی، تعیین کرد. آقای ویدال[1] در فرانسه، نخستین کسی بود که تولید رنگ را براساس بنزوکینون مورد تحقیق قرار داد و سولفورهای قلیایی را بر آن اثر می‌داد. دیده شد که رنگهای: پریمولین ساخته ا. ج. گرین، بنفش ساختهٔ لاوت[2] و ردیفی مطول از رنگهای گوگردی به بازار سرازیر شدند.

این شکوفایی گسترده درکمتر از نیم سده چندین صد مادهٔ رنگی ایجاد کرد که شیمیدانها برای تنظیم و طبقه‌بندی آنها، غالباً برپایه معیارهای گوناگون می‌کوشیدند. به‌دنبال این کارها نامگذاری وسیعی در کار آمد، و نیز نظریه‌های چندی روی قدرت پوشش رنگها، و کاربرد آنها عرضه شد. موفقیت این تشتت بزرگ در عمل منجر به این شد که رنگرزها مجهز به وسایلی گردند که بتوانند با آنها مشکلات کار خود را برطرف سازند و راه‌حلهایی برگزینند که برای نخهای گوناگون، از جمله نخهای مصنوعی جدید، مشتق از سلولوز، بهترین نتیجه را داشته باشند. گروههایی از این مواد رنگی، مثلاً رنگهای آنیلینی، بسرعت به توسط رنگهایی که بتازگی وارد بازار شده بودند بی‌اعتبار گشتند. اما تا پایان سالهای ۱۸۶۰ هیچ‌کدام از آنها، محصول آزمایشگاهی فراورده‌های طبیعی با منشأ گیاهی نبودند.

عطرهای مصنوعی: شیمیدانهای آلمانی با سنتزهای پیاپی الیزارین، سپس اندیگو، راه را بازکردند. در واقع سنتز واقعی در میان نبود زیرا این روشها برپایهٔ آنتراسن در مرحلهٔ نخست و نفتالین در مرحلهٔ دوم و کربنهای آروماتیک به‌دست آمده از تقطیر جزءبه‌جزء قطرانهای زغال‌سنگ، قرار داشتند. کارهای چشمگیر آقای برتلو در سنتز استیلن و نتایجی که از آن در سالهای ۱۸۵۰ گرفته شد، نشان داد که اصولاً می‌توان ادعا کرد که سنتز کلی هر ترکیبی از کربن امکان دارد. این ادعا از نظر مادی، تنها یک سده بعد یعنی زمانی به اثبات رسید که ساخت ترکیبات ساده‌ای نظیر استیلن، اتیلن، اکسید کربن و هیدورژن اقتصادی شده بودند.

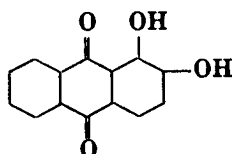
آقای پرکین در سال ۱۸۶۸، در آستانهٔ انجام کارهای سرنوشت‌سازی در سی‌وهشت سالگی، توانست کومارین، انیدرید یک اسید اتیلنی مشتق از بنزن را تهیه کند. این ترکیب را در آن زمان

1. Vidal 2. Lauth

یک آلدئید، $C_6H_4\langle\begin{matrix}O-CO\\CH=CH\end{matrix}$ ، ترکیب اسانسی بعضی از عطرها، می‌دانستند. در آن زمان از چند فراوردهٔ سادهٔ جانشینی برای صنعت عطرسازی، سالیسیلات دو متیل برای اسانس وینترگرین Wintergreen، آلدئید بنزنیک برای اسانس بادام تلخ و نیتروبنزن برای اسانس میربان Mirbane در سایهٔ کارهای کائور ـ و بعداً لاوت و ادوارد گریمو ـ آگاه بودند. چند سال بعد، کار آقای پرکین، سپس تحقیقات گریبه[1] و لیبرمان دربارهٔ الیزارین، انگیزهٔ یک رشته تحقیقات دربارهٔ ترکیبات عطرهای طبیعی شد. پژوهشگران خود را در برابر رنگهایی یافتند که از رنگهای مورد تحقیق شیمیدانهای آلمانی ترکیب ساده‌تری داشتند: الکل، اتر، آلدئید، ستون، فنول، مشتقات نیتروژن‌دار و ... تهیهٔ صنعتی آنها بزودی شروع شد.

سال ۱۸۷۶ را می‌توان سال آغاز ساخت عطرهای مصنوعی دانست.

الیزارین: باز در سال ۱۸۶۸ بود که آقایان گریبه و لیبرمان توانستند رنگ اصلی روناس، الیزارین را جدا سازند با تقطیر آن روی گرد روی، طبق روشی از احیا، که کلاسیک شده بود، موفق شدند هیدروکربنی به نام آنتراسن به‌دست آورند. از این کارها نتیجهٔ گرفتند که الیزارین مشتقی از ستون مربوطه، آنتراکینون، است که برای نخستین‌بار در سال ۱۸۲۶ با اکسایش آنتراسن به‌دست آمد. الیزارین باید نوعی دیوکسی آنتراکینون[2] باشد.



و آنها این جسم را از ستون و با ایجاد دو گروه هیدروکسید (OH) با دخالت مشتق برم‌دار، به‌دست آوردند. تصادف چنان خواست که آنها پیکربندی مولکولی مناسب را تعیین کنند زیرا موقعیتهای دیگری هم ممکن بود و هیچ‌کدام الیزارین نمی‌دادند.

این توفیق از نظر تاریخی مانند موفقیت پرکین در ده سال پیش از آن بود. اما کاربرد برم تحت فشار، در مقیاس صنعتی، هزینه و خطر زیادی را پذیرا می‌شد. آقای پرکین و چند شیمیدان دیگر این روش را، که چندی بعد به تولید صنعتی رسید، عملی کردند. در این روش یک مشتق سولفوندار

1. Graebe

۲. فرمول کامل هستهٔ بنزنی چنین است (CH, CH, CH, CH, CH, CH) که برای آسانی ضبط، پیوند دوگانه و نیز گروههای CH این هسته‌ها نشان داده نشده‌اند. ـ م.

آنتراکینون تهیه می‌شد، این مشتق را با ذوب قلیایی به‌عمل می‌آوردند.

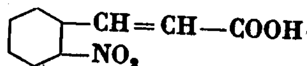
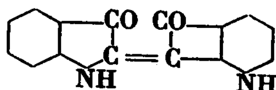
مانع دیگری پیش آمد، و آن بهای گزاف اسید سولفوریک غلیظ بود که در مقادیر کم در نوردهاوزن (ساکسونی) و بوهمیا به روش سنتی تخریب خشک سولفات در قرع تهیه می‌شد. این روش زمانی کنار نهاده شد که تهیهٔ اسید سولفوریک با روش مجاورتی که اصول آن را آقای کلمنز وینکلر در ۱۸۷۰ تعیین کرده بود در مقیاس صنعتی به توسط BASF برپایه کارهای کنیچ عملی شد.

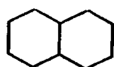
تولید صنعتی الیزارین کسادی کشت روناس را در ناحیهٔ میدی فرانسه به‌دنبال آورد. در بهترین سالهای رنگهای طبیعی، خریدوفروش آن رقمی حدود ۴۲/۵ میلیون فرانک (آن زمان) در سال بود. در سال ۱۸۶۸، ده سال پس از ساخت مووئین بوسیله پرکین، این رقم به کمتر از ۳۱ میلیون کاهش یافت و بازده سال بعد از موفقیتهای گریبه ولیبرمان به چهار میلیون رسید که چند سال بعد بکلی موقوف شد.

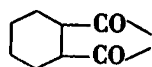
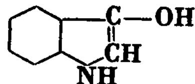
سنتز اندیگو: آخرین موفقیت بزرگ این سده در ساخت رنگهای مصنوعی نصیب ا. فون بایر و گروه شیمیدانهای BASF شد. اجرای سنتز اندیگو، نمایش جالبی از کار پژوهشی صنعتی است که تکیه بر شناختهای دقیق ساختمان مولکولی جسم مرکبی دارد که قرار است ساخته شود. این‌هم از نمونه‌های بزرگ یک پژوهش سرسختانه است که مدتی نزدیک به سی‌سال به ابتکار یک مؤسسه بزرگ صنعتی ادامه داشت، مؤسسه‌ای که از هزینه کردن یک میلیون لیره برای ساخت فراورده‌ای جهت جانشینی یک مادهٔ طبیعی بیمی به خود راه نداد و انحصار بازار جهانی را برای خود تأمین کرد. برپایهٔ نوشته‌های تاریخی بین شیمی صنعتی کلاسیک سدهٔ نوزدهم و شیمی شکوفا در نیمهٔ سدهٔ بیستم، در اثر نوعی تحول پیوستهٔ تکنیکهایی که منظماً دنبال می‌شدند شکافی ایجاد شد.

مسألهٔ ترکیب شیمیایی مواد رنگینی که از چند گیاه از نوع indigofera که در آنسوی دریا کشت می‌شوند و به‌طور سنتی در رنگرزی با نام نیل به‌کار می‌روند طبیعتاً باید در مخیلهٔ کارشناسان شیمی صنعتی در این نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم خطور کرده باشد. آقای بایر از سال ۱۸۶۹، درست پس از کارهایی که در مورد الیزارین به‌عمل آمد، بدان توجه کرد. اما تحقیق در این‌باره، طولانی و پرپیچ‌وخم بود. وی از اندیگو، یک ترکیب نیتروژندار با نام اندول استخراج کرد و این امر سبب شد که ساختار اندیگو را دریابد. دو سال بعد دو شیمیدان دیگر با نامهای امرینگ[1] و انگلر[2] توانستند اندیگو را با بهرهٔ کمی به‌دست آورند. آنان برای این کار ترکیب نیترواستوفنون را با گرد روی به‌عمل

1. Emmering 2. Engler

آوردند. گفته شده است که در این روش از کار اولیه گریبه و لیبرمان الهام گرفته شده است. روشهای گوناگون دیگری در چند سال، بدون اینکه موفقیتی داشته باشند پیشنهاد شدند. آقای بایر، تنها در سال ۱۸۷۸ خود حل مسأله را عهده‌دار شد. وی با مشتق نیتروژندار دیگری از اسید سینانیک که در عطرسازی آن زمان به‌کار گرفته می‌شد با فرمول  کار را شروع کرد. نتیجهٔ این رشتهٔ جدید تحقیقات این بود که وجود مادهٔ ایزاتین  *isatine* در اندیگو شناخته شد و در سال ۱۸۸۳ فرمول دقیق مولکول اندیگو را مشخص کرد، که از دو مولکول ایزاتین تشکیل شده است که توسط یکی از کربنهای بدون اکسیژن خود، به یکدیگر وصل شده‌اند.



وی از مشتقات بنزن به عنوان نقطهٔ آغاز صرفنظر کرد. تشکیل حلقهٔ دوم نیتروژندار با این مشتقات به‌وجود می‌آمد و اتصال این دو هسته، بسیار جزیی بود، وی روی مولکول نفتالین  کار کرد. آقای بایر دست به‌کار شکستن یکی از حلقه‌های بنزنی شد. برای این کار با عبور از مرحلهٔ اسید فتالیک  و دی‌آمید مربوطه  و اسید آنترانیلیک  آن را به یا حلقهٔ نیتروژندار و کربوکسیل‌دار تبدیل کرد.

نخستین واکنش، که اکسایش نفتالین بوسیلهٔ اسیدسولفوریک بود، تصادفاً بوسیلهٔ جیوهٔ یک دماسنج شکسته شده تسریع شد، جیوه همچون کاتالیزور عمل کرد. رشتهٔ تازه‌ای از تبدیلها به کمک اسیدکلرواستیک، بعد با یک ذوب قلیایی[1] سبب شد که به ساختار اندوکسیل دست یابد که فرمول آن به ایزاتین بسیار شباهت دارد و یک اکسایش ساده بوسیلهٔ هوا آن را به اندیگو تبدیل می‌کند. وانگهی ترکیب اخیر در همان دیگ رنگ‌سازی ایجاد می‌شود و فراورده‌ای که به مصرف‌کنندگان داده می‌شود لوکوباز اندوکسیل است.

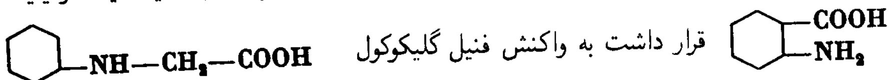
این رشته واکنشها، دشوار بودند اما بازده آنها برای اینکه به یک مادهٔ صنعتی تبدیل شوند کافی بود. در تمام طول این تحقیقات، یک سلسله اختراعات به ثبت رسیده از نتایج به‌دست آمده

۱. ساخت صنعتی فنول به روش ترکیب سولفونیک اسیدها با سود می‌باشد. ـ م.

حمایت می‌کردند.

از بین عواملی که به فون بایر و همکارانش امکان دادند تا به نتایج قابل قبول برای این صنعت برسند، یکی دسترسی آزاد به اسید سولفوریک غلیظ بود که صنعتی شدن روش مجاورتی موجب چنین و فوری شده بود و نیز عمل الکترولیز کلرورسدیم، که برای تهیه هیپوکلریت مورد نیاز در واکنش سوم و اسید کلرو استیک مورد نیاز واکنش چهارم لازم بودند. مؤسسه BASF که بخوبی با این وسایل مجهز بود ـ و شاید در جهان تنها مؤسسه‌ای بود که همهٔ این وسایل را داشت ـ در ۱۸۹۷ اندیگوی سنتزی را به بازار فرستاد. طی چند سال کشت گیاه روناس در سراسر جهان به طرف رکود رفت اما نه با آن سرعتی که در ساحل.مدیترانه‌ای فرانسه نابود شد.

چندین واکنش فون بایر در سالهای ۱۸۹۰ بوسیله شیمیدانهای مختلفی مورد بررسی قرارگرفتند. روش اصیل BASF سریعاً ساده شد و پس از ده یا پانزده سال که مؤسسات انگلیسی و امریکایی آن را دنبال کردند، روشهای خاص خود را به‌کارانداختند. فرانسه از لحاظ بارزگانی بیشتر گرفتار بود زیرا این کارخانه آلمان شعبه‌هایی در آنجا داشت که لوکوباز خود را از آلمان دریافت می‌داشتند و درجا از آن استفاده می‌کردند. روش فرانسه که بر پایه آنیلین و اسید کلرو استیک، یا اسید آنترانیلیک



واندوکسیل تغییر یافت. در واقع، زمانی‌که پراتیک این تغییر شکلها به‌حد صنعتی رسید، تعدادی راههای گوناگون برای ساخت این ترکیب، انعطاف‌پذیرتر شدند. مشتقات اندیگو را بسرعت با تعویض هر دو گروه NH با گوگرد، تیو اندیگو قفائی برای پنبه، تعویض برم با دو هیدروژن روی حلقه‌های بنزنی تولید کردند. این رنگهای که سیبا *Ciba* آنها را می‌ساخت تشکیل گامی از آبی تا شرابی را دادند و آن رنگ ارغوانی که در جهان باستان از نرم‌تنانی به‌دست می‌آمد از نو به‌کار گرفته شد، زیرا فرمول آن دقیقاً دی‌برمو اندیگو می‌باشد.

۴

وسایل فیزیکی صنایع شیمیایی

در طی سی سال پایانی سدهٔ نوزدهم، صنعت شیمی بر کاربرد وسایل فیزیکی تولید، سرما و برق، که باید در رأس عوامل اصلی قرارگیرند مهارت یافت زیرا این امور پایهٔ وسایل مورد استفادهٔ کنونی ما هستند. هر چند که این دو تکنیک از یکدیگر کاملاً متمایز هستند روشهای کاربرد آنها بوسیلهٔ شیمی صنعتی، شباهتهایی با یکدیگر دارند. نخست اینکه پدیده‌های فیزیکی مبنای این وسایل، حدود نیم سده برای سرما حتی مدت زیادتری پیش از آنکه مرحلهٔ کاربرد صنعتی آنها شروع شود، شناخته شده بودند. شناخت علمی آنها با آهنگ نسبتاً سریعی دنبال شد و موضوعهای پژوهشی آنها نیز در زمان خود بسیار پراهمیت بودند. با این‌همه، نظریه‌پردازان و تجربه‌گران آزمایشگاهی هرگز دلمشغولی کاربرد صنعتی آنها را نداشته‌اند. تکنسین‌ها به موازات فیزیکدانان فعالیت می‌کردند، اما تکنسین‌ها بر فیزیکدانان، جز دریافتن اصول کلی و راه‌حل مسائل شخصی، یعنی معنی روشهای عملی و اصلاح وسایل به‌کارگیری این روشها، پیش بودند. وسایل فیزیکی پس از گذرانیدن یک مرحلهٔ نسبتاً کوتاه تحقیقات فنی، امکان ساخت اجسامی را که در طبیعت فراوان هستند از قبیل: نیتروژن، اکسیژن، هیدروژن و کلر، به مقدار زیاد و با هزینهٔ کمی بالا، فراهم ساختند.

برای ساخت این اجسام شمار زیادی از فراورده‌ها مورد بررسی قرارگرفتند، اما بدون اینکه، به استثنای کلر، ساخت آنها واقعاً رواج یابد. وانگهی اجسام زیادی، از جمله گازهای کمیاب، فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی را توانستند با شرایط خوب اقتصادی تهیه کنند، و بدین‌ترتیب، آنها به مواد خام موجود برای دیگر فعالیتهای مهم صنعتی تبدیل شد. طبیعی است که روشهای صرفاً متالورژی که ایجاد و گسترش آنها مورد بررسی قرارگرفتند، نباید فراموش شوند.

سرما و مایع کردن گازها

ماشینهای سرمازای

شماری مشاهدات بدون ارزش یا تجربیات ارزشمند آزمایشگاهی در دورهٔ بین اواخر سده هجدهم و اواسط سدهٔ نوزدهم، این گمان را رواج دادند انقباض یک گاز، سبب گرما می‌شود و انبساط آن سبب سرما. ماشینهای اولیه سرمازای برپایهٔ انقباض و سپس انبساط عوامل بسیار ابتدایی نظیر هوای جوّ، ساخته شدند. هوای منقبض بین دو فاز در یک سردکنندهٔ آبی خنک می‌شد.

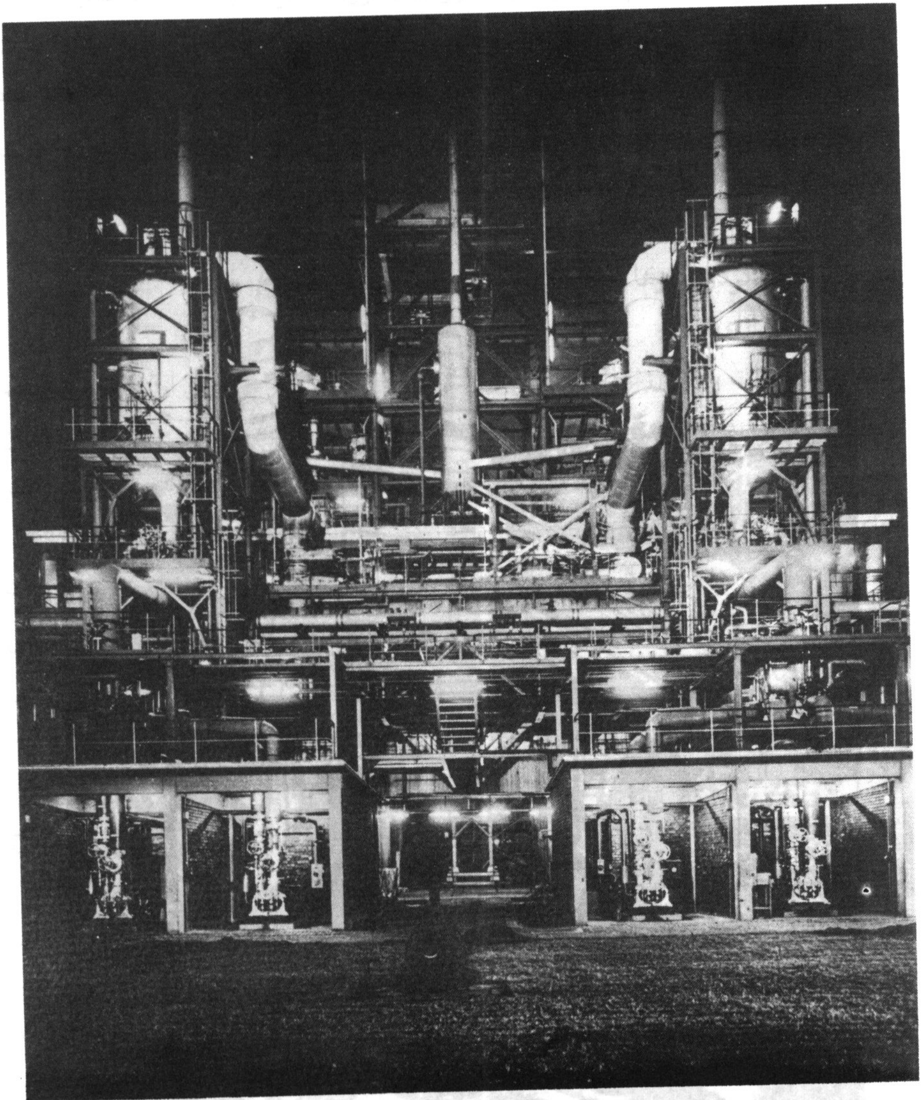
یخ طبیعی: تنها هدفی که در سال ۱۸۶۰ دنبال می‌شد تولید یخی بود که دادوستد آن به علت بویژه نیازهای تازهٔ صنایع یا حمل‌ونقل مواد خوراکی بیش از پیش اهمیت می‌یافت. یخ طبیعی کشورهای شمالی یاکوهستانی و زمستانهای نواحی معتدل، تنها منبع غنی یخ بودند. اما یخ طبیعی غالباً دارای ناخالصیهای مضر بودند و بنابراین، غیرخوراکی، از آنها در سردخانه‌ها، انبارهای کشتیها و در صورت نیاز در برخی صنایع، مثلاً آبجوسازی استفاده می‌شد. برای استفاده در روی میز غذا، آب آشامیدنی را با مخلوطهای خنک‌کننده، یخ ریز و نمکهای قلیایی سرد می‌کردند. تولید این یخ بسیارکم بود.

ماشین سرمازایی با دتانت هوا: همین‌که کمپرسورهای با بخارآب با کارکرد رضایتبخش و بهای مناسب ساخته شد، تصور ماشینهایی که تنها با دتانت هوای فشرده ایجاد سرما کنند آسان گردید. چنین می‌نماید که نخستین ماشینی از این نوع، ساخت یک آمریکایی به نام جان گوری[1] بود که در سال ۱۸۵۱ آن را به ثبت رسانید؛ این ماشین برای خنک کردن سالنهای بیمارستانها ساخته شده بود. یک صنعتگر آلمانی که گویا مهارت زیادی در این نوع کارها داشت با نام وینتهاوزن[2] در سال ۱۸۵۵ نخستین ماشین واقعی باد سرد را برای ساختن یخ طرح کرد، که بعدها مدل همهٔ ماشینهای یخساز شد. آقای وینتهاوزن در سال ۱۸۶۹ افتخار طرح یک مدار بسته از هوا را داشت که با یک‌بار دتانت و تولید یخ، وارد یک تبادلگر گرمایی لوله‌ای می‌شد که در آنجا هوایی را که از

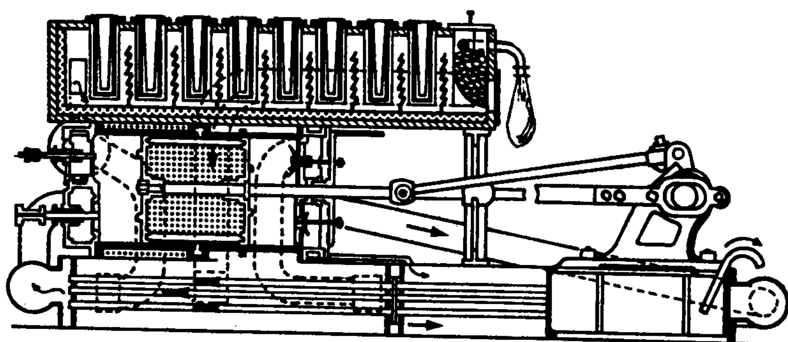
1. J. Gorrie 2. Windhausen



تابلوی ۲۳. چاههای نفت در یک در ناحیهٔ تیتسویل.



تابلوی ۲۴. کارخانهٔ تولید اتیلن از نفت (حدود ۱۹۶۵).



شکل ۴۰.ماشین یخسازی وستینگهاوس.
بدنهٔ ماشین خنک‌کننده‌ای دارد که در لوله‌های آن از یکسو آب سرد و از سوی دیگر، هوای فشردهٔ سرد جریان دارند (قسمت راست). هوای فشردهٔ سرد وارد سیلندر تلمبه سمت چپ پیستون می‌شود. این هوا به‌هنگام وارد آوردن فشار در قسمت راست، منبسط می‌شود و وارد قسمت یخساز در بالا می‌شود که ظرفهای یخ در آنجا گذاشته شده‌اند. سپس به قسمت پایین (قسمت چپ) باز می‌گردد و در آنجا بین هوای انبساط یافته و هوای فشرده‌ای که از قسمت راست سیلندر تلمبهٔ هوا خارج می‌شود، تبادل حرارت انجام می‌گیرد.

کمپرسور می‌آمد خنک می‌کرد (شکل ۴۰). دمای باد کمپرسور توسط لایه‌ای از آب که دور سیلندر کمپرسور می‌گردید و در بخش خنک‌کننده وارد می‌شد پایین می‌آمد. در پایان مدار، هوای انبساط یافته، خنک، از نو در سیلندر کمپرسور وارد می‌شد.

دتانت هوای فشرده و خنک شده در سیلندر کمپرسور، و روی جبهه‌ای از پیستون در زمان فشار حجم دیگری از هوا روی جبههٔ دیگر انجام می‌گیرد. احتمالاً این همان امکان دتانت در اثر کار خارجی مورد بحث شدید در سی سال بعد است که از اندیشهٔ آقای وینتهاوزن گذشته است. وانگهی، در مدل نهایی، ماشین او که در سال ۱۸۷۱ ساخته شد، دتانت در سیلندری غیر از سیلندر کمپرسور انجام می‌گرفت و این خصیصه به گفتهٔ یکی از معاصرانش «از لحاظ بازده کار بسیار بهتر است» که احتمالاً برای این سیستم و در آن زمان درست بود.

در سال ۱۸۶۷، ماشینی از نوع وینتهاوزن در فرانسه ساخته شد که تهویهٔ کاخ نمایشگاه عمومی پاریس در شان دو مارس[1] را تأمین می‌کرد. آقای پل ژیفار در سالهای ۱۸۷۰ ساخت همین نوع ماشین را در فرانسه عهده‌دار شد و بزودی کارگاههای دیگری در انگلستان و آمریکا بدان روی آوردند.

1. Champ-de-Mars

ماشینهای دتانت هوای جوّ، از جهت یخسازی، موفقیتی سریع اما کوتاه مدت داشتند. این ماشینها به علت کمی حجم گرمایی هوا، همیشه ناگزیر بزرگ و در نتیجه سنگین و جاگیر ساخته می‌شدند. آنها پس از مدت کوتاهی، ویژهٔ عملیات یخسازی یا خنکسازی در بعضی از صنایع و سردخانه‌ها، بخصوص برای نگاهداری گوشتهای یخ‌زده شدند. با این حال، وجود آنها، در تبلیغ صنعت سرما تأثیر زیادی داشت.

ماشینهای تبخیر: روش دیگری که تقریباً در همان ایام برای ساختن ماشینهای سرمازا به کار گرفته شد به نتایجی بسیار مهمتر دست یافت. سرمازایی با جذب گرمای تولید شده از تبخیر مایعهای تبخیر شونده ایجاد می‌شود. این اجسام می‌توانند مایع در دما و فشار معمولی، یا گازی و مایع شده، در اثر کاهش دما و یا افزایش فشار، یا با ترکیبی از هر دو عامل باشند. اما طرز عمل هرچه باشد، این ماشینها یک کمربند گرم و یک کمربند سرد دارند که چرخهٔ تغییر شکلهای سیال بین آنها حفظ می‌شود.

دو پژوهشگری که با توفیقهای متفاوتی به ساخت این ماشینها دست یازیدند عبارت بودند از دو فرانسوی به نامهای فردینان کاره و شارل تلیه. آقای کاره خیلی زودتر، از سال ۱۸۵۷ دست به‌کار شده بود. وی نخست از اتر سولفوریک به‌عنوان مادهٔ سرمازای استفاده می‌کرد. در این زمان پژوهشگران دیگری مانند شاو و هریسون در انگلستان از همین ماده برای همین کار استفاده می‌کردند. هر دو نفر چیزی جز تکرار تجربهٔ جان لزلی[1] فیزیکدان اسکاتلندی، که در سال ۱۸۱۷ جذب گرمای برخاسته از تبخیر بخارآب در زیر کاسهٔ یک تلمبهٔ هوایی را آشکار کرد، کار دیگری انجام ندادند. یک استکان اسید سولفوریک که در زیر کاسه گذاشته شده بود، بخارهای ناشی از انبساط را جذب می‌کرد و پدیدهٔ تبخیر ادامه می‌یافت. اتر سولفوریک مدت چند سال در ماشینهایی به‌کار می‌رفت که یک تبادلگر حرارتی لوله‌ای، یخساز، داشتند که اتر در آن به علت وجود یک خلاء جزیی تبخیر می‌شد. تلمبه‌ای که یک ماشین بخار آن را به‌کار می‌انداخت، این خلاء را به‌وجود می‌آورد. بخارهای اتر بعداً در یک خنک‌کنندهٔ مارپیچی مایع می‌شدند. جریانی از آب‌نمک بین ظرفهای هر یک از قسمتها، یخ زدن آب بطریهایی را که در فرورفتگیهای قسمت یخساز گذاشته می‌شدند و نیز سرد شدن بخارهای اتر را تأمین می‌کرد.

در سالهای ۱۸۶۰ در شهرهای بزرگی چند واحد بزرگ از این نوع نصب شدند، اما آنها معایبی داشتند. ماشینهای ساخت آقای ریزه برای یخسازی در شهر پاریس، اتلاف اتر در هر ماشین در سال حدود ۱۲۵ کیلوگرم بود، درحالی‌که ظرفیت اتر آنها بیش از ۴۵ کیلوگرم نبود. به علت بهای

1. J.Leslie

بالای اتر و اشتعال‌پذیری آن، این یخسازها پس از مدت کوتاهی کنار گذاشته شدند.

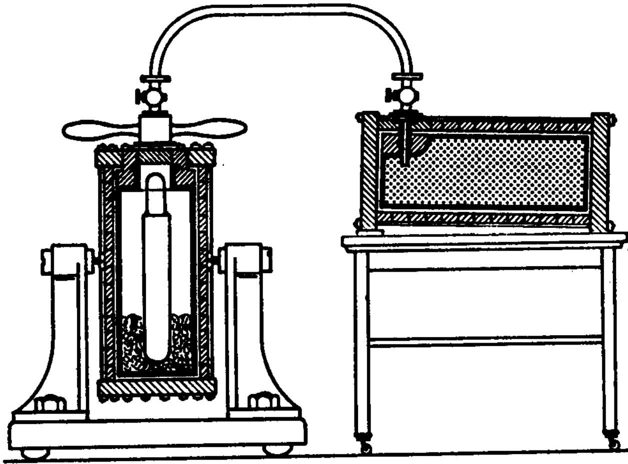
کلرور متیل و آمونیاک: آقای شارل تلیه، چند سال پس از کاره، اتیل متیلیک را، که بسیار آسان آن را تهیه می‌کرد، به‌کار گرفت. اما این گاز، هنوز، حتی در آزمایشگاه‌ها، کمیاب بود. آقای تلیه نخستین ماشین یخسازی خود را در سال ۱۸۶۲ ساخت و مدت چند سال، حتی زمانی‌که آمونیاک به‌کار می‌رفت از اتر متیلیک استفاده کرد.

سرانجام نخستین ماشین سرمازایی که بخوبی پاسخگوی صنعت نوین یخسازی بود با کاربرد آمونیاک ساخته شد. چندین صنعتگر به مزایای آمونیاک پی بردند و محققاً آنها بر اثر آزمایشهای فاراده متوجه این امر شده بودند. تحقیقات فاراده در سال ۱۸۲۳ در کتابهای فیزیک بتدریج منعکس می‌شد، که یکی از آنها مربوط به گذاردن ماده‌ای در یک لولهٔ خمیده است که با گرم کردن یک ترکیب گازی، هیدرات کلر، مخلوط اسید کلریدریک و سولفور آهن، محلول آمونیاک در کلرور نقره را آزاد می‌کند. این لوله به شکل لامپها مسدود شده بود و این ماده در یکی از آنها مربوط به گذاردن ماده‌ای در یک لولهٔ خمیده است که با گرم کردن این ماده، گاز آزاد می‌شد و در شاخهٔ سرد در اثر فشاری که درون لوله بالا رفته بود، مایع می‌شد.

در سال ۱۸۳۴ آقای تیلوریه مخترع فرانسوی یک دستگاه فلزی ساخت که نوعی استفاده از لولهٔ فاراده[1] بود و وی را قادر می‌ساخت که گاز کربنیک را با دتانت ساده‌ای، مایع سازد و حتی با دتانت دیگری آن را به جامد تبدیل کند (شکل ۴۱). هر چند که آزمایش تیلوریه کاربرد صنعتی نیافت و در زمرهٔ آزمایشهای تاریخی مربوط به مایع کردن گازهایی ثبت شد که در آن زمان به گازهای دائمی شهرت داشتند، این آزمایش شهرت بسیار یافت و بی‌شبهه در جهتگیری افکار صنعتگران به سوی کاربرد گازهای مایع شدنی برای ساخت ماشینهای یخساز مؤثر افتاده است. با این‌همه، نخستین کاربرد آمونیاک در آغاز بر پایهٔ حلالیت زیاد این گاز در آب بوده است. پژوهش‌گران متعددی از اواخر سال ۱۸۵۰ در این‌باره اندیشیده‌اند و آقای کاره که این اصل را در سال ۱۸۵۹ به ثبت رسانید قطعاً نخستین کسی است که کار تحقیق را تا ساخت ماشینهای عملی به پیش برده است.

ماشینهای جذبی: این ماشینها را دستگاههای گرایشی یا جذبی نامیده‌اند. از یک دیگ محتوی محلول غلیظ آمونیاک و یک مایع‌کننده که یک مارپیچ غوطه‌ور در یک ظرف آب سرد بود، و بالاخره یک یخساز تشکیل می‌شدند. آمونیاک بین این قسمتها می‌گردید. گرم کردن بوسیلهٔ یک مارپیچ ایجاد تبخیر در دیگ و بالا رفتن فشار در بخشی از دستگاه می‌کرد. بخار در مایع‌کننده، مایع

۱. یا لولهٔ میدان، یا لولهٔ قوا، لوله‌ای است که از خطوط قوا تشکیل می‌شود. ـم.

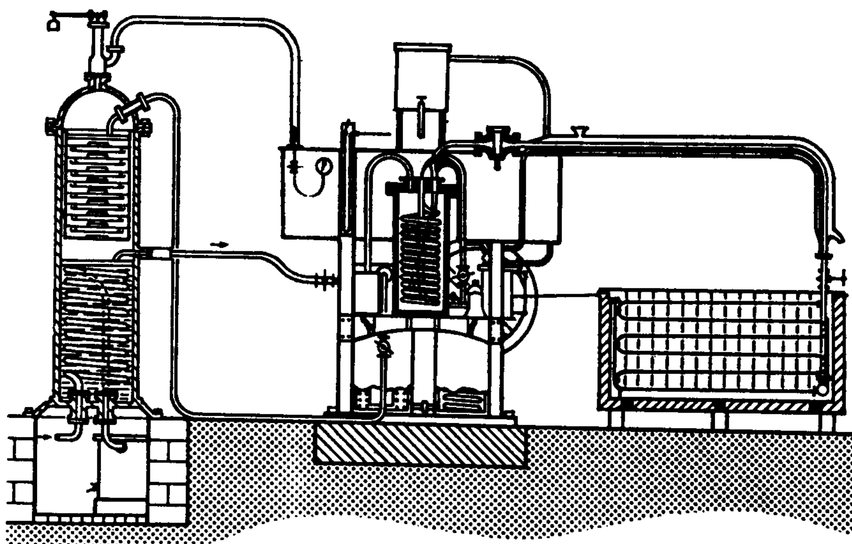


شکل ۴۱.ماشین تیلوریه برای مایع کردن گاز کربنیک.
سمت چپ، لولهٔ فلزی که حول مرکز خود حرکت نوسانی دارد. این لوله، محتوی بیکربنات و ظرفی دارای اسید سولفوریک است. با نوسان دادن این لوله، اسید ظرف روی بیکربنات می‌ریزد و CO_2 تحت فشار تولید می‌شود. با بازکردن شیرها، دتانت ایجاد می‌شود و ظرف سمت راست با CO_2 مایع پر می‌شود.

می‌شد. مایع از ردیفی از لوله‌ها، که نقش تنظیم‌کننده و تبادلگر حرارتی را داشتند می‌گذشت تا به مارپیچهای یخساز برسد و در آنجا بخار می‌شد. تغییر حالت، سبب سرد شدن آب‌نمک یا محلول کلرور کلسیم، می‌شد که مارپیچها در آن غوطه‌ور بودند. در این ظرف، خانه‌هایی بود که کاسه‌های آبهایی که باید یخ زده می‌شدند در آن خانه‌ها گذاشته می‌شدند، و نیز لوله‌هایی که آب‌نمک سرد برای خنک‌کردن محلهایی که می‌خواهند سرد شود در آن جریان دارند. در پایان، گاز آمونیاک از راه تبادلگرهای حرارتی به بخش مرکزی ماشین باز خواهد گشت و در آنجا با مایع رقیق شده‌ای که از دیگ می‌آید برخورد خواهد کرد. آمونیاک در مایع حل می‌شود و محلول غلیظ شده، به دیگ، تلمبه خواهد شد.

این دستگاه پیچیده برای تأمین گردش پیوستهٔ گاز و مایع بین بخشهای متعدد آن ساخته شده است. وانگهی، تأثیر تبادل حرارت در نقاط مختلف تأمین شده‌اند (شکل ۴۲). با این دستگاه می‌توان ۱۰۰ کیلوگرم یخ در ساعت تهیه کرد. موفقیت ماشین کاره قطعاً مدیون سازندگان آن، آقایان مینیون و رووار است که در زمان خود مالک بهترین کارگاههای ماشین‌سازی پاریس بودند.

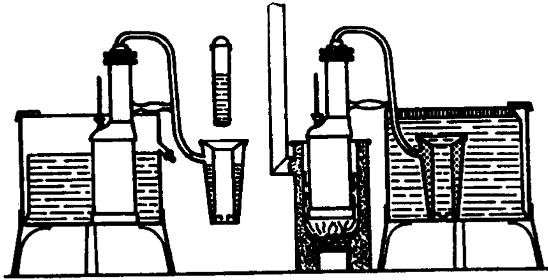
آقای فردینان کاره در همین زمان یک دستگاه یخساز خانگی ساخت که بر همان اساس



شکل ۴۲.ماشین یخساز فردینان کاره.
دیگ محتوی آمونیاک محلول است که هر گاه گرم شود بخار می‌گردد (سمت راست). آمونیاک در مخزن سرد، مایع می‌شود. زمانی‌که دیگ در ظرف خنک‌کننده قرار دارد (سمت چپ)، آمونیاک تبخیر می‌شود و در کاسه تولید یخ می‌کند و خودش در مایع دیگ از نو محلول می‌گردد.

ماشین یخساز، اما ساده‌تر، بود زیرا پیوسته کار نمی‌کرد (شکل ۴۳). این دستگاه دیگی داشت که کوره‌ای آن را گرم می‌کرد و محتوی آمونیاک محلول بود، و نیز یک ظرف گیرندهٔ بخار که در طشتی پر از آب‌نمک قرار داشت. این ظرف مخروطی شکل بود و آبی که باید یخ می‌شد در آن ریخته بودند. آمونیاک، همین‌که با وارد شدن در ظرف گیرنده، مایع می‌شد، دستگاه برمی‌گردید، دیگ در طشت آب‌نمک، و یخساز بر تکیه‌گاه ساده‌ای قرار می‌گرفت. آمونیاک، بخار و از نو در آب سرد دیگ حل می‌شد. این تبخیر، دما را پایین می‌آورد و موجب می‌شد که در هر ساعت یک کیلوگرم یخ ساخته شود.

دستگاههای فردینان کاره که در سال ۱۸۶۲ در نمایشگاه لندن به نمایش گذاشته شدند، کنجکاوی بسیاری را برانگیختند و صنعتگران دیگری از آنها تقلید کردند. آقای ادمون، برادر فردینان کاره، کمی بعد در ۱۸۶۶ آزمایش آقای جان لزلی را در سرد کردن تُنگهای یخ خانگی، مستقیماً

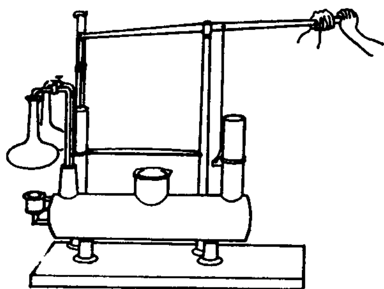


شکل ۴۳.یخساز خانگی فردینان کاره.
سمت راست، دیگ محتوی آمونیاک محلول، که هر زمان گرم شود، آمونیاک آن تبخیر می‌شود. آمونیاک در مخزن خنک، غلیظ می‌شود. زمانی‌که دیگ در طشت خنک‌کننده قرار دارد (سمت چپ) آمونیاک تبخیر می‌شود و آب موجود درکاسه‌ها یخ می‌بندند؛ بخار آمونیاک در مایع دیگ از نو حل می‌شود.

عملی کرد. این، نوع دستگاه کلاسیک برای نگاهداری اسید سولفوریک و یک تلمبهٔ کوچک خلأ بود که با دست عمل می‌کرد و تصویر آن در همهٔ کتابهای فیزیکی دیده می‌شود. دستهٔ این تلمبه یک همزن را به‌کار می‌انداخت و این همزن تماس اسید و بخارآبی را که در اثر کاهش فشار پدید آمده بود از نو برقرار می‌کرد. آبی که بخار تهیه می‌کرد و باید سرد می‌شد در تُنگهایی، روی لوله‌های مکش گذاشته می‌شدند (شکل ۴۴). یخساز خانگی ساخت آقای ادمون کاره، به‌مدت چند سال درکافه‌هایی که ناگزیر از تهیهٔ سریع یخ بدون هرگونه تأسیسات مکانیکی بودند رواج فراوان داشتند. این دستگاه همچنین در پیشرفت ذائقهٔ مشتریان در مشروبات خُنک مؤثر بود. آقای ادمون کاره به روشهای برادر خود که در اواخر سدهٔ نوزدهم، با وجود موفقیتهای ماشینهای لینده، پیکتت و عدهٔ دیگر، هنوز هم روش خود را دنبال می‌کرد، روی آورد.

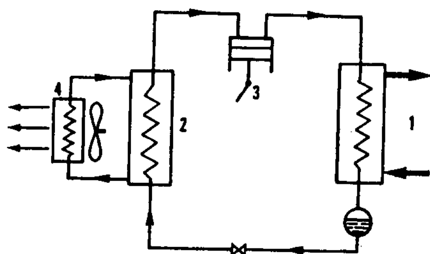
شارل تلیه: کارهای آقای تلیه در برهه‌ای از ۱۸۶۳ ـ ۱۸۷۹ انجام گرفته‌اند. آقای تلیه پس از آزمایش اتر متیلیک که برای وی تلخکامی به‌بار آورد در سال ۱۸۶۷ نخستین ماشین کمپرسی خود را که آمونیاک مصرف می‌کرد، ساخت؛ آمونیاک بسیار بهتر از اتر عمل می‌کرد (شکل ۴۵). این ماشین را در شکلات‌سازی آقای ژول مینیه در نوازییل نصب کرد. ساختمان آن همانند دیگر ماشینهای یخسازی بود که بعداً ساخته شدند.

نام آقای شارل تلیه را هاله‌ای از افسانه دربر گرفته است که در آغاز سدهٔ بیستم می‌خواستند به وی لقب «پدر» سرمازایی اعطا کنند. وی مانند بعضی از معاصران خود، از قبیل برژس یا آده در



شکل ۴۴.ماشین یخساز تُنگی ادمون کاره.
ظرف افقی محتوی اسید سولفوریک است. سمت چپ، تلمبهٔ بادی عمودی، سمت راست، دسته‌ای که‌همزن داخلی را فعال می‌سازد.

فرانسه دارای مغزی عمدتاً تخیلی بود تا ابداع‌کننده. وی که در همه چیز کنجکاو بود با هر چیزی ور می‌رفت. به علت کمی اطلاعاتش در مسائل اساسی و عدم تواناییش در صنعتگری از یک شکست به شکست دیگری می‌رسید. وی بذر چند اندیشه را پاشید: خنکسازی چند مرحله‌ای که بعدها از آن برای مایع کردن گازهای دائم استفاده شد؛ پراتیک نگاهداری در انبار و حمل در کشتیهای سردخانه‌دار. اما تلیه نتوانست از این ابتکارها، سودی برگیرد.
اندیشه‌های وی در آن زمان از سوی صنعتگران دیگری به عمل درآمدند، اما حق وی را فراموش



شکل ۴۵.اصول ماشین یخساز تلیه.
کمپرسور ۳ گردش آمونیاک را بین کندانسور ۱ و تبخیرکننده ۲ تأمین می‌کند. آب‌نمکی که در ۲ سرد شده است در خنک‌کنندهٔ هوا ۴ گردش دارد. دستگاه هوای سرد شده را در لوله‌های محوطه‌ای که باید خنک شود، به‌طور ضربانی می‌دمد.

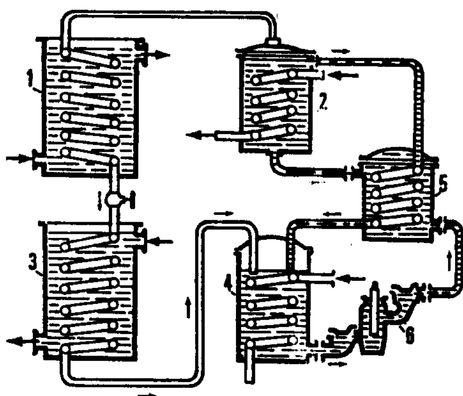
کردند، هم‌چنانکه او فراموش کرده بود که کاره کاربرد آمونیاک را ده سال پیش از وی به ثبت رسانیده است و بدین علت گرفتاریهای قضائی برای وی پیش آمد و در نتیجه او چهرهٔ کسی را یافت که قربانی دسایس کثیفی شده است. تنها نوآوری واقعی وی مربوط به واژهٔ frigorifique (≈ سرمازای) است، نامی که در سال ۱۸۷۶ برای دومین کشتی سردخانه‌دار خود، که مخصوص حمل گوشت از آرژانتین به اروپا بود، برگزید.

مطلبی که باید گفته شود این است که در این زمینه وی یک نوآور بود، گرچه کشتی وی پس از مدت کوتاهی از ردیف کشتیهای بازرگانی حذف شد. در عصر وی هیچ چیز، برای حمل گوشتها و غذاهای گیاهی یخی یا سرد شدهٔ استرالیا، اوروگه، آرژانتین، نیوزیلند در حدود سال ۱۸۸۰ وجود نداشت، اما حدود بیست سال بعد، این رشته چنان توسعه یافته بود که تعادل منابع کشورهای صادرکننده و ذخایر کشورهای اروپایی، بویژه انگلستان تغییر کرده بود.

در همان دوران قطارهای سردخانه‌داری که روی خط آهن حرکت می‌کردند نیز گام‌های اولیهٔ خود را، بویژه در ممالک متحدهٔ آمریکا، که خطوط آهن نقاط دور را به هم متصل می‌ساخت، به پیش برداشتند.

ماشینهای لینده و پیکتت: در آستانهٔ سال ۱۸۸۰، ساخت ماشینهای سرمازای و کاربرد آنها، دیگر یک صنعت مهم به‌شمار می‌آمد. پایان این نوآوری با رواج ماشینهای کمپرسی مشخص می‌شود که طی بیست سال ماشینهای دیگر را از میدان به‌در کرد. این موفقیت بویژه مرهون آقای کارل فون لینده، مهندس آلمانی و رائول پیکتت فیزیکدان سویسی است. برخلاف تلیه که به همه کار می‌پرداخت و معاصرانش او را نادیده گرفتند، آقایان لینده و پیکتت توانستند مشخصات وسایل خود را در سایهٔ اطلاعات ترمودینامیکی حساب کنند. لینده نخستین کسی بود که نظریهٔ ماشین سرمازای کمپرسی را با بررسی رفتار گازهای مختلف در دسترس تنظیم کرد و گاز آمونیاک را برگزید. وی در اصلی که تلیه پایهٔ کار خود قرار داده بود هیچ تغییری نداد. این چرخه دارای سه مرحلهٔ زیر بود: فشرده‌سازی گاز با فشاری که در مورد آمونیاک در حدود ۱۵ اتمسفر بود؛ سرد کردن و میعان گاز فشرده شده؛ دتانت همراه با تولید سرما.

هرچند که ترمودینامیک در آن زمان بتازگی از مرحلهٔ یک نظریهٔ ریاضی بیرون آمده بود و هنوز هیچ کمکی به پژوهشهای تکنیکی نمی‌توانست بکند، لینده متوجه شد که چرخه یک ماشین سرمازای مشابه چرخه یک ماشین محرکهٔ بخاری است و به یک رشتهٔ کارهایی دست زد که ظاهراً فراتر از ساخت نخستین مدل ماشین وی در سال ۱۸۷۵ بود و این کارها را با همکاری مهندسان



شکل ۴۶.ماشین سرمازا با جذب گاز.
کندانسور ۱ گازی را که در دیگ ۲ از محلول خود تبخیر شده است دریافت می‌کند. گاز در کندانسور که با آب خنک می‌شود، مایع می‌شود. این مایع در خنک‌کنندهٔ ۳ تبخیر می‌شود و آب‌نمک را که حامل سرما می‌باشد خنک می‌سازد، آنگاه به سوی ظرف ۴ هدایت می‌شود تا در آنجا محلول گردد. محلول فقیر دیگ ۲ از تبدیلگر ۵ می‌گذرد. تلمبهٔ ۶ گردش را در ۲، مارپیچ بخارآب، در ظرف ۴ و بالاخره مارپیچ آب سرد تأمین می‌کند.

متعددی ادامه داد. گرچه ترمودینامیک برای پژوهش درکار موتورهای حرارتی پایه‌گذاری شده بود، ساختار آن، به‌عنوان یک دانش همگون، حدود نیم سده، در علوم مهندسی، هیچ کاربردی، جز سومین مرحلهٔ ماشینهای سرمازای نیافته بود.

گازهای سرمازایی که در سال ۱۸۷۵ به‌کار برده شد، آمونیاک بوسیلهٔ لینده وگاز سولفورو بوسیلهٔ پیکتت بود. بعدها، حدود ۱۸۸۹، ماشینهای با گازکربنیک ساخته شدند که نخستین نمونهٔ آن، کار وینتهاوزن بود. مواد سرمازای دیگری از قبیل کلرور متیل و مخلوطهای گاز سولفورو و گازکربنیک نیز، آزمایش شدند.

صرفنظر از نوع گازها، مدار آنها در همهٔ انواع ماشینها یکی بود. در حالت گازی سردکننده درکمپرسور جذب می‌شدند و به حالت فشرده به سوی کندانسور (مایع‌کننده) رانده می‌شدند تا در آنجا خنک و مایع گردند. از آنجا به سردکننده روانه می‌شدند که در آنجا تبخیر آنها به سوی کمپرسور، موجب می‌شد مقداری از گرمای خود را به آب‌نمکی که مارپیچها در آن بودند، واگذارند (شکل ۴۶).

طبعاً نوع این مدار بسیار گوناگون بود، و به گاز به‌کار رفته و محلولهایی که سازندهٔ دستگاه برای حل مسائل جزیی بسیار برگزیده بود، بستگی داشت؛ وانگهی در جریان کار، هرکدام از آنها متحمل اصلاحات متعددی شدند.

در ماشین لینده، کمپرسور، نخست حالت ایستاده داشت، اما پس از اندک مدتی آن را افقی کارگذاشتند و حالت افقی برای همهٔ ماشینهای سرمازای عمومیت یافت، جز اینکه درکشتیها و واگنها گاهی ازکمپرسورهای ایستاده استفاده می‌شد. آقای لینده در سال ۱۸۸۹ ماشینی ساخت که فشار در دو طبقه عملی می‌شد. کمپرسور نخستین، فشارگاز آمونیاک را به حدود هشت اتمسفر می‌رسانید و دومی این فشار را تا پانزده یا شانزده اتمسفر بالا می‌برد. آقای لینده در سیلندرکمپرسور قطراتی از آمونیاک مایع تزریق می‌کرد که تبخیر آنها به‌طور مؤثری، گرمای ایجاد شده را جبران می‌کرد. کمپرسور ماشینهای پیکتت را یک پوشش آبی دور سیلندر، خنک می‌ساخت و داخل خود پیستون آب گردش داشت. همین وسایل روی ماشینهای گازکربنیکی نیز به‌کارگرفته می‌شد. زمانی که گاز سولفور به‌کار می‌بردند فشار ایجاد شده بسیار کمتر از آمونیاک، و در حدود سه اتمسفر بود. ماشینهایی که ازگاز سولفورو استفاده می‌کردند درکمتر از $-10°C$ کار نمی‌کردند، دمایی که برای ساختن یک مایع کافی بود ولی برای خنک کردن سردخانه‌ها ناکافی، در هر دو مورد کمپرسورها از نوع رفت و برگشتی بودند و آنها را طوری طراحی کرده بودند که فضای غیرقابل استفاده بین سر پیستون وکف سیلندر، حداقل باشد.

ماشین گازکربنیکی: ماشین آقای وستینگهاوس که گازکربنیکی بود در سال ۱۸۸۹ ساخته شد. این ماشین گویا با فشار ۷۰ اتمسفر کار می‌کرد ـ فشاری که دشواریهای گوناگونی، هم در ساخت کمپرسور و هم در نشتی شدن آن، پدید می‌آورد. این فشار در دو یا سه طبقه ایجاد می‌شد. بعضی کمپرسورها ایستاده گذاشته می‌شدند و محتوی آب گلیسرین‌دار بودند که نقش پیستون مایع را داشت. ازگلیسرین همچنین بدین منظور و به منظور لیزانه در ماشینهای کلرور متیل استفاده می‌شد. در سال ۱۸۸۹ چند دستگاه از این ماشینها در فرانسه ساخته شدند.

در قسمتهای دیگر این ماشین نیز، سردکننده وکندانسور، چنین تفاوتهایی دیده می‌شد. این قسمتها اساساً یا از مارپیچها، یا یک ردیف لوله‌های عمودی یا مایل تشکیل می‌شدند که به کلکتور (گردآور)های بالایی و پایینی لحیم بودند. محلولهایی که برای قسمتهای مختلف به‌کارگرفته شدند به اندازه انواع گوناگون سردکننده‌ها، متنوع بودند. هر سازنده، بدون اینکه در اصول ساخت خود نوآوری جدی داشته باشد، یک نوع سردکننده می‌ساخت.

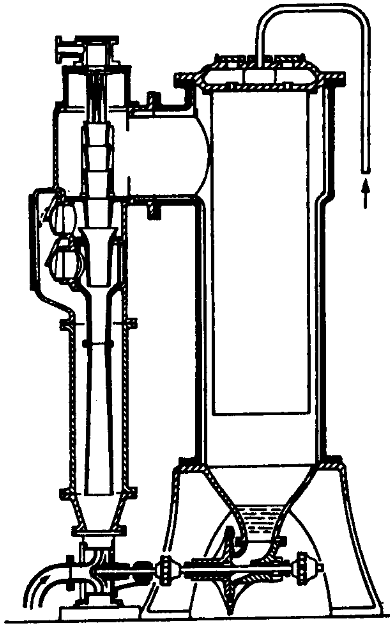
پیشرفت تکنیک سرمازایی: در سالهای نخستین سدهٔ بیستم، ساخت ماشینهای سرمازای، تکنیکی کاملاً جا افتاده داشت. ترمودینامیک در امر تعیین کاربرد گازها، ایجاد مدلهای تازه کمپرسور، کندانسور، سردکننده‌ها، راهنما شده بود. هر کدام از این قسمتها به‌طور جداگانه در کتابهای فنی، بررسی شده‌اند و نیازی به شرح کلی مدلهای ساخت هر شرکت نیست.

تکنیک سرمازایی زاییدهٔ یک جریان فکری و صنعتی برخاسته از چند آزمایش چشمگیر آزمایشگاهی بود. این جریان تا آغاز سالهای ۱۸۸۰ هنوز کاملاً شکوفا نشده بود زیرا در همهٔ کشورها، کارگاههای مشهور مکانیکی در کار ساخت موتورهای مشابهی بودند. همگی آنها در ساخت ماشینهای بخار، تلمبه‌ها و توربینها تجربهٔ بزرگی به‌دست آورده بودند. چنین می‌نماید که مشکلات این وسایل در همه جا به آسانی رفع شدند.

آقای لینده شرکت خود را در ویسبادن، و شعبه‌ای از آن را در انگلستان تأسیس کرد. تأسیسات کِل در فرانسه و زولتسر در سویس حق استفاده از امتیازهای وی را به‌دست آوردند. ماشینهای لینده، خیلی مانده بود که در جهان رواج یابند. پیکتت که شرکت ماشین‌سازی ژنو را داشت، ماشین خود را می‌ساخت. ماشینهای گاز کربنیکی را در آلمان، وینتهاوزن و در انگلستان، هال می‌ساخت. کارگاههای متعدد دیگری نیز بنوبهٔ خود برای تصاحب بازار تازه کوشیدند، اما هیچیک از دستاوردهای ۲۵ ساله فراتر نرفتند.

ماشین لوبلان ـ وستینگهاوس: با این‌همه، سیستمهای دیگری مورد بررسی قرار گرفتند. سیستمی که بیش از بقیه از روشهای کلاسیکی فشرده‌سازی گازهای مایع شونده دور می‌شد، کمی پیش از سال ۱۹۱۰ به بازار آمد. این سیستم که پیشنهادی آقای موریس لوبلان و ساخت وستینگهاوس بود از تبخیر آب استفاده می‌کرد (شکل ۴۷). در این سیستم که کاملاً اصیل بود از آزمایش قدیم آقای لزلی که آقای ادمون کاره کوشیده بود آن را عملی سازد، استفاده می‌شد.

اما در این سیستم از کاربرد اسید سولفوریک برای جذب بخارآب، در ماشینی که به قصد کار کردن در مقیاس صنعتی ساخته می‌شد، صرفنظر نشده بود. به همین دلیل تلمبه‌های پیستونی اجازهٔ تبخیر و جذب سریع بخارآب را نمی‌دادند. به علت کشش بسیار ضعیف بخارآب در دمای صفر و پایینتر از آن، باید در ماشین، فشارهایی در حدود چند میلیمتر جیوه (در دمای $-10\,^{\circ}C$ فشار ۲ میلیمتر) حفظ شود. راه‌حلی که مخترعان برای ایجاد خلأ اندیشیده بودند، به کارگیری تلمبه‌ای بود که بخارآب را از بالا به پایین یکی از بخشهای عمودی ماشین، کندانسور می‌راند. این تلمبه که چیزی جز یک انژکتور آقای پل ژیفار که روی لوکوموتیوها نصب می‌شد نبود، بخارآب آب‌نمک



شکل ۴۷.ماشین سرمازای لوبلان ـ وستینگهاوس.
ستون سمت راست، آب‌نمک همراه با آب‌نمکهایی که از لوله‌های سمت راست وارد شده است. ستون سمت چپ، تلمبهٔ مکشی بخارآب از آب‌نمک با تجهیزات همگرا ـ واگرا از بالا به پایین. در پایین، تجهیزات توربینی که با بخارآبی که از یک تلمبهٔ پاشنده و یک مجرای خروجی می‌آید فعال می‌شود، و نیز در سمت راست، تلمبهٔ جریان دهندهٔ آب‌نمک سرد شده دیده می‌شود.

محتوی در بخش دوم عمودی، محفظهٔ تبخیر، را با خود می‌برد. وانگهی، یک توربین بخار برای به‌کار انداختن تلمبهٔ گردش آب‌نمک و یک توربین آبی که تخلیهٔ آب کندانسور را تأمین می‌کرد، این ماشین را فعال می‌ساختند. بخارآب که در توربین موتور عمل کرده است به بخش بالایی کندانسور هدایت می‌شد تا کار تلمبهٔ بخارآبی تأمین شود. ماشین وستینگهاوس ـ لوبلان در سایهٔ تعدادی از این مشخصات، مرحلهٔ تازه‌ای را در کار پژوهش فنی مربوط به سرماسازی گشوده است.

کاربرد سرمای مصنوعی: سرمای مصنوعی از سالهای ۱۸۶۰ در نگاهداری و حمل خوراکیها بسرعت کاربرد فراوان یافت. سرمای ویژهٔ این کار، ملازم دستکاریهایی بود که برای تأمین سرمای مناسب و کافی باید رعایت می‌شدند، بویژه زمانی‌که مسئلهٔ نگاهداری از قطعات بزرگ گوشت

مطرح بود و خطر تراکم رطوبت، که گوشت را بسرعت فاسد می‌کرد. در سال ۱۸۸۶ آقای ف. هـ. پوئتش[1] مهندس آلمانی برای منجمد کردن لایه‌های مرطوب و حرکت‌کنندهٔ خاک که چاه معدن در آنها حفر می‌شد از یک ماشین سرمازا استفاده کرد. سرانجام، علاوه بر آبجوسازی، شکلات‌سازی، لبنیات، رشته‌های گوناگونی از شیمی صنعتی از سرمای مصنوعی به عنوان عامل مناسبی برای تهیه و استخراج فراورده‌های گوناگون استفاده می‌کردند.

مایع کردن گازهای دائمی

شیمی صنعتی در این مورد از طریق تکنیکهای تولید سرما مستقیماً سهیم است؛ تکامل منطقی این تکنیکها در اواخر سدهٔ نوزدهم، به پیدایش یک روش تولید صنعتی فراورده‌های گازی انجامید که تا آن زمان به مقدارکم با وسایل شیمیایی ساخته می‌شدند یا اینکه اساساً ساخته نمی‌شدند. این فراورده‌ها اساساً عناصر متشکلهٔ هوا، اکسیژن و نیتروژن و بعدها، گازهای کمیاب هستند که بعضی از آنها در ساختن لامپهای برق به‌کار رفتند، و سرانجام هیدروژنی است که با تقطیر جزء‌به‌جزء گاز آب به‌دست می‌آمد.

گازهای دائم: مایع کردن گازهای به اصطلاح دائم در مقیاس صنعتی زمانی مورد بحث قرارگرفت که آزمایشهای تامس اندروز، لویی کایوتت[2]، پیکتت، اولس‌زفسکی[3]، و وروبلفسکی[4] نشان دادند که دائمی بودن این گازها، تنها معلول نارسا بودن وسایلی است که در آن زمان برای مایع کردن آنها به‌کار می‌رفتند.

پس از تجربیات فاراده در ۱۸۴۵ و نیز آزمایشهایی که فیزیکدانان متعددی انجام دادند، معلوم شد که شش گاز در برابر همه آزمایشهای مایع کردن، دمای پایین ($-10\ ^\circ C$)، که با کمک مخلوط یخ خشک و اتر به‌دست می‌آمد و فشار حدود ۵۰ اتمسفر، می‌توانند پایدار باشند. این گازها عبارتند از: اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن، دیوکسید نیتروژن، اکسید کربن و متان.

این مسئله کنجکاوی فیزیکدانان همهٔ کشورها را برانگیخت و از سال ۱۸۶۳ تا اواخر سده، یک سلسله از آزمایشها، حل مسائل نظری و عملی مایع کردن همهٔ گازها را ممکن ساختند. در مدت سی‌سال تنها پژوهشهای آزمایشگاهی مربوط به تغییر حالت گازها بر حسب دما و فشار ادامه داشت.

در سال ۱۸۶۳ آقای تامس اندروز، فیزیکدان بریتانیایی آزمایشهای فاراده را، باز با توفیق جزیی از سر گرفت؛ اما زمانی‌که با گاز کربنیک کار می‌کرد نقطهٔ بحرانی را کشف کرد ـ دمایی که

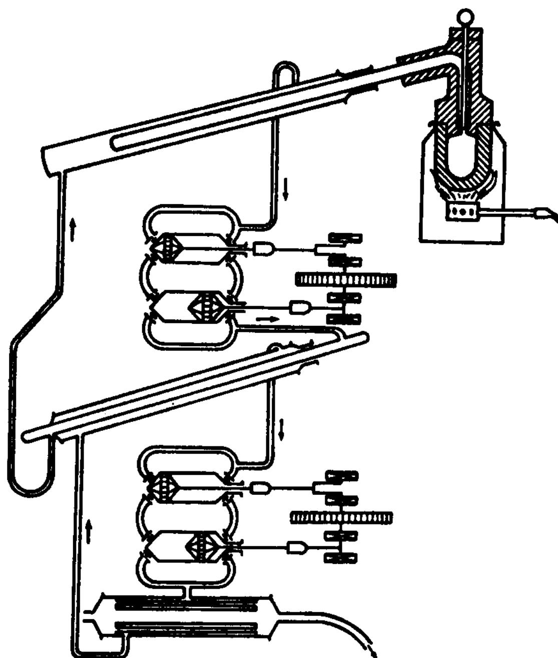
1. F. H. Poetsch 2. L. Cailletet 3. Olszewski 4. Wroblewski

در بالاتر از آن فشار هر قدر هم زیاد باشد گاز به مایع تبدیل نمی‌شود. وی این پدیده را با رسم منحنیهای همدمای (ایزوترمیک) فشار بیان داشت. نقطهٔ بحرانی گاز کربنیک (‎۳۰٫۹° C‎) درجه است. گفت‌وگوهای مربوط به این آزمایشها این اندیشه را پیش آورد که همهٔ گازها، حتی گازهای دائمی، یک نقطهٔ بحرانی دارند و بنابراین در صورتی مایع می‌شوند که در زیر نقطهٔ بحرانی خود باشند، یعنی در دمایی احتمالاً بسیار پایین، که در آزمایشهای آن زمان، دسترسی بدان نداشتند.

موفقیت در آزمایشگاه: آقایان لویی کایوتت، و رائول پیکتت هر یک مستقلاً، اما تقریباً در یک زمان، در پایان ۱۸۶۷ توانستند گازهای دائمی را مایع کنند؛ روشی که این دو فیزیکدان به‌کار برده بودند بسیار متفاوت بود. دستگاه کایوتت که در همهٔ کتابهای فیزیکی تصویر شده است یک ماشین دستی است که حجم بسیار کمی از گاز را در لولهٔ بسیار باریکی که روی حمام جیوه‌ای گذاشته شده است فشرده می‌سازد. انبساط ناگهانی چنان سرمایی ایجاد می‌کند که مهی از مایع لولهٔ آزمایش را کدر می‌سازد.

پیکتت برای نخستین بار از روش خنکسازی تدریجی، که تلیه اصول آن را در کتاب خود در سال ۱۸۶۷ با عنوان *L'ammoniaque dans l'industrie* بیان کرده بود استفاده کرد. وسیلهٔ آزمایشی وی عبارت بود از یک ظرف دربستهٔ فلزی که گاز مورد مطالعه، با واکنش شیمیایی: گرم کردن کلرات پتاسیم برای تهیهٔ اکسیژن، تجزیهٔ فورمیات پتاسیم بوسیلهٔ پتاس برای تهیهٔ هیدروژن، در آن تولید می‌شد (شکل ۴۸). ظرف دربستهٔ واکنش، به لولهٔ طویلی متصل است که رو به پایین از یک خنک‌کننده عبور می‌کند. پیکتت بدین ترتیب، مانند مورد لولهٔ فاراده، تأثیر فشاری را که در دستگاه با آزاد شدن گازها در اثر واکنش شیمیایی ایجاد می‌شد با خنک کردن از بیرون بوسیلهٔ لوله خنک‌کننده، خنثی می‌کرد.

این سیستم خنکسازی بدیع بود و سرانجام هم آقای پیکتت الهام‌بخش سازندگان ماشینهای سردکنندهٔ صنعتی شد. خنک‌کننده‌ای که لولهٔ واکنش را در میان گرفته بود جریانی از گاز کربنیک مایع را از خود عبور می‌داد و تبخیر پیوسته گاز کربنیک را، مکش تلمبه‌ای که با کمپرسور جفت شده بود تضمین می‌کرد. بدین‌ترتیب، گاز کربنیک از نو در لوله‌ای که دور آن را مادهٔ خنک‌کنندهٔ قویتری گرفته بود مایع می‌شد. مادهٔ خنک‌کنندهٔ اخیر به همان روش اما با جریانی از گاز سولفور و مایع تهیه می‌شد. هر دو جسم پس از مایع شدن به نخستین خنک‌کننده‌های خود باز می‌گشتند و چرخه تکرار می‌شد. آقای پیکتت محققاً با آگاهی گاز سولفورو را به جای آمونیاک به‌کار برده بود، زیرا وی دو سال بود که در ماشینهای سرمازای خود از آن استفاده می‌کرد زیرا هم آسان به‌دست



شکل ۴۸.دستگاه آزمایشی پیکتت برای مایع کردن اکسیژن.
بالا، سمت راست، ظرف دربستهٔ تهیه گازها، که در لولهٔ سمت چپ خنک شده است به شکل فشرده جمع می‌شوند و CO_2 مایع، که زوج تلمبه ـ کمپرسور، چرخهٔ آن را از زیر دستگاه می‌گذرانند. در دومین خنک‌کننده، SO_2 مایع، خنک می‌شود.

می‌آمد و هم با آن مأنوس شده بود.

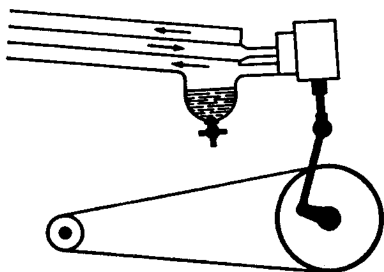
این روش بسیار عالی و هوشمندانه بود. این فیزیکدان نتوانسته بود حالت سیال را در داخل ظرف واکنش ببیند ـ کاری که کایوتت در لولهٔ دستگاه خود انجام داده بود. پیکتت درحالی‌که با توپی ظرف واکنش مانور می‌کرد، متوجه نوعی جهش سیال شد و آن را اکسیژن یا هیدروژن مایع و حتی گویا جامد معرفی کرد. وی بعدها به اشتباه خود، لااقل در مورد هیدروژن بودن سیال، اعتراف کرد. نقطهٔ بحرانی این گاز پایینتر از $-200\,^\circ C$ است و دماهایی که پیکتت به‌دست آورده‌بود بین -130 تا $-140\,^\circ C$ بود.

مایع کردن و تکنیکهای سرمازایی: نتایج کارهای کایوتت و پیکتت در زمان خود، اندیشه‌های علمی را به هیجان آوردند، اما ضمناً این نظرات بدبینانه بودند زیرا مدت مشاهدهٔ مایعات، کوتاه بود و این اجسام نمی‌توانستند در این مدت کم بررسی شده باشند. طبعاً آنها انگیزهٔ ردیفی از تحقیقات شدند که در این فاز، در سال ۱۸۹۸ با مایع کردن مقدار قابل توجهی هیدروژن به پایان رسید. نخست دو فیزیکدان لهستانی با نامهای وروبلفسکی و اولس‌زفسکی، همراه یکدیگر، یا مستقلاً، تجربیات کایوتت را، با تغییر دادن شرایط و به‌کار گرفتن اتیلن مایع به‌عنوان سردکننده، ادامه دادند. آنان بدین‌ترتیب نیتروژن، اکسیژن و اکسید کربن را در برههٔ ۱۸۸۳ تا ۱۸۸۵ مایع کردند. کایوتت در همان زمان از روش سرد کردن پلکانی با اتیلن و متان استفاده کرد و همان نتایج را به‌دست آورد. سرانجام آقای جیمز دیوئر از سال ۱۸۸۴ به یک رشته کارهایی دست زد که تکرار یا تکمیل کارهای پیشینیان بود اما موفق به مایع کردن مقدار قابل توجهی هوا در سال ۱۸۹۵ شد. همه می‌دانند که دیوئر همچنین نخستین ظرفی را طرح کرد که مایعات جوشان را در دماهای بالا نگاه می‌دارد.

گرچه این سیاههٔ طویل کارها، بانی شاخهٔ تازه‌ای از فیزیک شد که بی‌درنگ دانشمندان متعددی، بویژه آقایان کامرلینگ ـ اونس هلندی آن را گسترده ساختند. هیچ‌یک از این دو دانشمند امکان کاربرد صنعتی تکنیکهای سرمازایی را در سر نداشتند.

دشواریهای فنی: اصول این ماشینها که از سال ۱۸۹۵ برای مایع کردن هوا در اندازه‌های صنعتی به‌کارگرفته شدند در سال ۱۸۵۷ بوسیلهٔ زیمنس مشخص شد (شکل ۴۹). این ماشین باید انگیزهٔ دتانت هوای فشرده در یک موتور هوایی باشد. هوای انبساط یافته برای خنک کردن تدریجی انجام می‌گیرد زیرا تبادل گرما بین هوای ورودی و هوای خروجی، خنک شدن پیوستهٔ هوای ورودی را درپی دارد. این سیستم این مزیت را داشت که مانند روش تدریجی تلیه به مکانیسم پیچیده‌ای نیاز نداشت و تنها، وسیله ساده‌ای برای اجرای آن کافی بود. این روشها به موانع زیادی برخورد کردند که تا مدتها باقی ماندند.

نخست مسألهٔ انزوای حرارتی بود که در آغاز این دوره بتازگی با آن برخورد کرده بودند. سپس پراتیک سرمای صنعتی که در سالهای ۱۸۶۰ ـ ۱۸۷۰ کاربرد چوب‌پنبه و کپسولهای دارای عایق گرمایی را زیاد کردند. موانع دیگر بدین علت برطرف نشدند که پایین آوردن دما به‌طور تدریجی، پیش از مایع کردن هوا، سبب مایع کردن و یخ زدن ناخالصیهای هوا، بویژه آب و اسید کربنیک می‌شود و لوله‌ها را می‌بندند. وانگهی کارکردن با وسایل مکانیکی به‌علت یخ زدن لیزانه‌ها، بیش از پیش دشوار می‌شود.



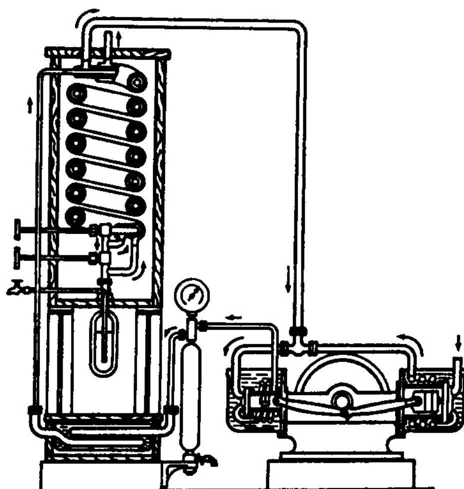
شکل ۴۹.تبادلگر حرارتی با تولید کار.
هوای فشرده به درون موتور می‌رود و در آنجا در لولهٔ داخلی، دتانت می‌یابد. هوایی که انبساط یافته است، در حال فرار از لوله‌های محیطی، آن را خنک می‌کند.

آقایان لینده، همپسون[1]، تریپلر[2] که به غیرعملی بودن روش مخترعان متعدد متقاعد شده بودند به روشی از دتانت روی آوردند که بدون کار خارجی بود و آن اقتباس از آزمایشی بود که بسیار پیشتر از آنها توسط آقایان تامس و ژول انجام گرفته بود و طبق آن در جریان چنین دتانتی، دما تا اندازه‌ای ـ متناسب با افت فشار ـ پایین می‌آید، و این به‌علت پیروی نکردن گازها از قانون ماریوت ـ گی ـ لوساک است. مقدار خنک شدن در دماهای پایین، مطابق فرمولی که تامس و ژول داده بودند، زیادتر است. بنابراین، روش مبتنی بر تبادل گرما که زیمنس آن را پیشنهاد کرده بود می‌توانست در شرایط حذف موتور هوایی و تعویض آن با منفذی دارای شیر، به دماهای بسیار پایینتری راه یابد. خالص کردن هوا، مسأله‌ای بود که حل آن در این دوران دشوار نبود.

دتانت بدون کار خارجی: اصلاح ماشینهای صنعتی چند سال، از ۱۸۹۵ تا ۱۹۰۰ وقت گرفت. لینده نخستین کسی بود که این کار را انجام داد و او بود که به این صنعت بزرگترین تکانها را داد. وی حدود میانهٔ ۱۸۹۵ در مونیخ ماشینی را به نمایش گذارد که ظرفیت یخسازی آن از نیاز یک آزمایشگاه افزون نبود، اما پیش‌نمونهٔ ماشینهای بعدی شد.

اصول این ماشین، کاهش فشار هوا از ۲۰۰ به ۴۰ اتمسفر در مجرای داخلی یک مارپیچ سه‌گانهٔ هم‌مرکز است (شکل ۵۰). هوایی که دتانت یافته است، از بخش میانی مارپیچ، برای سرد کردن هوای ورودی، بالا می‌رود. مایع با فشار معمولی در ظرفی که در پایین مارپیچ قرار دارد جمع می‌شود و در آنجا نوعی غلیان جزیی ایجاد می‌شود. این بخش هوای سرد شده تا $-140\,^{\circ}C$ بنوبهٔ خود، بخش بیرونی مارپیچ را طی می‌کند. بازیابی سرما، بدین‌ترتیب بسیار پیشرفته است.

1. Hampson 2. Tripler

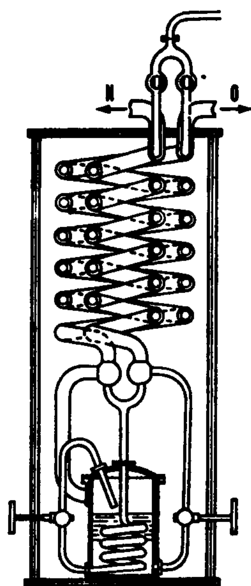


شکل ۵۰.نخستین نوع ماشین لینده برای مایع کردن هوا.
پایین، سمت راست، کمپرسور هوا با فشار ۴۰ اتمسفر در سیلندر سمت راست و ۲۰۰ اتمسفر در سیلندر سمت چپ. هوای فشرده به طرف مرکز در یک بطری سرریزکنندهٔ آب و سپس به طرف مارپیچی که در یک خنک‌کننده قرار دارد رانده می‌شود. این هوا بوسیلهٔ مجرای سمت چپ به بالای ستون برده می‌شود و از راه مجرای مرکزی مارپیچ ستون پایین می‌آید و فشارش تا ۴۰ اتمسفرکم می‌شود. آنگاه در مارپیچ خارجی صعود می‌کند و کمپرسور از نو آن را وارد چرخه می‌کند. هوای مایع شده پس از چند بارگردش، شروع به جمع شدن در ظرف زیر مارپیچ می‌کند. تبخیر جزیی آن در $C°$ ۱۴۰− مارپیچ را از راه سومین مجرای خارجی، سرد می‌کند.

چون برای جبران مقدار هوای مایع شده، مقداری هوا به‌طور منظم وارد این چرخه می‌شود، از نظر مکانیکی بهتر است که فشار هوا، تا حد فشار متعارفی، پایین نیاید.

این نوع ماشینها، در سالهای بعد به‌کار گرفته شدند. این ماشینها ۵۰ لیتر هوای مایع در هر ساعت تهیه می‌کردند و این توانایی، بعضی از آزمایشها را درکارخانه‌های شیمیایی، ممکن ساختند. آقای لینده در ۱۹۰۰ ماشین پیشرفته‌تری را به نمایش گذارد که یک دستگاه سردکنندهٔ آمونیاکی به آن افزوده شده بود تا هوا را پس از فشرده‌سازی، برای اینکه بازده مایع آن بالا رود، سرد کند.

تبخیر جزءبه‌جزء هوا: در این فاصلهٔ زمانی، مسألهٔ صنعتی دیگری به آغاز راه‌حل خود رسید. بحث بر سر عملیاتی است که طبعاً باید پس از مایع کردن هوا انجام گیرد و آن جدا سازی عناصر



شکل ۵۱.ماشین لینده، برای تقطیر جزءبه‌جزء هوای مایع.
هوای فشرده از بالای ستون از راه مجرای میانی دو مارپیچ پایین می‌آید؛ گازی که در مجراهای حلقه‌ای بالا می‌رود، آن را سرد می‌کند. هوا وارد مارپیچی می‌شود که از ظرف پایینی هوای مایع می‌گذرد. بخشی از هوا که در مارپیچ مایع شده است از طریق لولهٔ سمت چپ در ظرف می‌ریزد و بخشی که مایع نشده است نیتروژن است که همراه با نیتروژنی که در ظرف بوسیلهٔ بخش حلقه‌ای مارپیچ چپ، تبخیر شده است صعود می‌کند. اکسیژن، در بخش حلقه‌ای مارپیچ راست، تبخیر می‌شود.

متشکلهٔ آن: اکسیژن و نیتروژن است. آقای لینده در ۱۸۹۵ دستگاهی ساخت که اساس آن را دو مارپیچ دارای جریان مضاعف تشکیل می‌دادند که در آنها هوای فشرده شده‌ای که از پایین به بالا در لولهٔ مرکزی هر مارپیچ جریان داشت با هوای غنی از نیتروژن، که جزء مایع ناشدهٔ را در پایین دستگاه تشکیل می‌داد و از فضای حلقه‌ای یکی از مارپیچها می‌گذشت تبادل گرما می‌کرد و هوای غنی از اکسیژن که بخش مایع را تشکیل می‌داد در فضای حلقه‌ای مارپیچ دوم تبخیر می‌شد (شکل ۵۱).

در واقع جدا کردن این دو جزء از یکدیگر چنان دشوار است که تنها با غنی کردنهای پیاپی جزءهای گوناگون تبخیر مایعها می‌توان آن را انجام داد. لینده از آغاز کار، مشکل را با هوشیاری

حل کرد. دستگاه کامل وی دارای واحدهای متعدد مایع کردن و تقطیری بود که طوری مرتبط با یکدیگر بودند که گازهای حتی‌المقدور غنی از اکسیژن یا نیتروژن به‌دست آیند.

کاربرد صنعتی این دو جسم ساده فوراً آشکار نشد. لینده در آن سالها در این اندیشه بود که صنعت هوای مایع بخت چندانی ندارد. گرچه جدا کردن فیزیکی این دو جزء یک کاربرد نیم صنعتی و نیم علمی بود، اما سود اقتصادی چندانی نداشت. و باز می‌توان به یاد آورد که روش الکترولیز دقیقاً در همین زمان وسیله‌ای برای تولید اکسیژن و هیدروژن گازی شده بود. چنین می‌نمود که اکسیژن کاربرد زیادتری دارد، و در رشته‌های پزشکی، جوشکاری و کارهای گوناگون آزمایشگاهی و چند مادهٔ شیمیایی از آن استفاده خواهد شد.

یکی از نخستین کاربردهای آن تهیهٔ یک مادهٔ منفجرهٔ بسیار قوی بود که با جذب شدن آن در زغال متخلخل چوب به‌دست می‌آمد. از این ماده برای نخستین بار در یکی از معادن آلمان و بویژه به‌هنگام سوراخ کردن تونل زیمپلون استفاده شد. از آنجا که این ماده باید در زمان کاربرد ساخته شود، یکی از دستگاههای لینده در هر کارگاه، چه در بریگ[1] و چه در دومودوسولا[2] وجود داشت.

دربارهٔ نیتروژن باید گفت که برای جدا کردن اکسیژن از آن روشهای متعددی وجود داشت که از آن جمله تثبیت شیمیایی اکسیژن بود. نیتروژن به‌عنوان عنصر شیمیایی، هیچ کاربردی نداشت. حدود سال ۱۹۱۰ اندیشیدند که از آن برای باد کردن لاستیکهای اتومبیل استفاده کنند.

چند سال بعد وضع روبه تغییر گذاشت زیرا روشهای سنتز آمونیاک رواج یافته بود. پس از جنگ جهانی اول صنعت هوای مایع، گسترهٔ چشمگیری دربرابر خود یافت. علاوه‌بر روش اولیه تقطیر جزءبه‌جزء، تقطیرهای تکمیلی برای تهیهٔ هر گاز به حالت خالص، بسیار تکمیل شده بودند.

دتانت با کار خارجی: یک مهندس جوان فرانسوی از شرکت تامس ـ هوستن به نام ژورژ کلود در راه‌انداختن این صنعت سهم بسیار دارد. وی برای خود کارهایی را، تنها چند سال بعد از ساختن نخستین ماشین مایع کردن هوا، شروع کرد. کلود که مغزی نوآور داشت ـ که در موارد دیگری هم شاهد آن خواهیم بود ـ از همان سال ۱۸۹۸ کار دتانت هوای فشرده شده را با ایجاد کار خارجی همراه کرد. وی در این راه برخلاف اندیشه‌های مرسوم، عمل کرد و برای حذف موانع قانونمند بتنهایی می‌کوشید.

مانع عمده دربرابر وی، علاوه‌بر خالص کردن هوا پس از فشرده کردن و پیش از انبساط آن برای پرهیز از انجماد گاز کربنیک یا آب موجود در دستگاهها، محال بودن آشکار روغنکاری کافی قطعات حرکت‌کنندهٔ موتور در دمای $-190^\circ C$ بود. آقای کلود که همراه آقای هس حمل‌ونقل

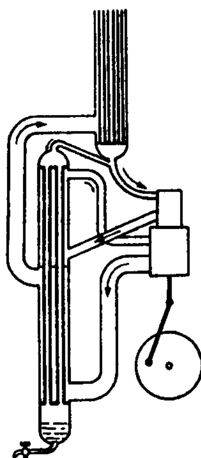
1. Brig 2. Domodossola

استیلن محلول در استون را همراه با فشار، طرح کرده بود درپی پایین آوردن هزینهٔ تولید استیلن برای افزایش مصرف آن برآمد. به همین دلیل او اندیشید که در تولید کاربید (کربورکلسیم)، به‌جای گرمای برق، که در آن زمان گران بود از احتراق زغال در اکسیژن استفاده شود. ماشینهای لینده از اکسیژنی که از هوا گرفته می‌شد استفاده می‌کردند. این کوشش در زمینهٔ کاربید دنبال نشد، اما ثمرهٔ آن، روشهای ژرژ کلود برای مایع کردن هوا و نوعی تقطیر جزءبه‌جزء بود که شرکت هوای مایع Société de l'Air liquide که ترقی بسیار سریعی داشت، آنها را مورد استفاده قرار داد.

کلود با مراجعه به هستهٔ تئوری زیمنس کوشید تا از این واقعیت که، محاسبهٔ ترمودینامیکی ثابت می‌کند که بازده دتانت با کار خارجی بیشتر از بازده دتانت با جریان ساده است، استفاده کند. اندیشهٔ بدیع وی، روغنکاری موتور بوسیلهٔ خود هوای مایع بود. اما دراین‌صورت لازم بود که تا رسیدن به منطقهٔ میعان، کار کردن موتور تأمین باشد. آقای کلود از اتر نفت، یعنی بنزین اتومبیل، برای راه انداختن در دوران کاهش دمای پیشین میعان، استفاده کرد. بعدها، وی اظهار داشته بود که هوای مایع برای روغنکاری کافی نیست درحالی‌که بنزین از این نظر کافی است.

اما وجود دشواریهای دیگر، وی را به ادامهٔ پژوهش در حدود چهار سال دیگر، تا رسیدن به موفقیتهای اولیه ناگزیر ساخت. دشواریهای کار، محدود به مواد و تجهیزات موجود در آن زمان نبودند، بلکه انحرافهایی که گازها در دماهای نزدیک به میعان آنها، نسبت به قوانین صرفاً نظری ماریوت و گیلوساک از خود بروز می‌دادند هم وجود داشت. سرانجام، کلود یک وسیلهٔ ابتکاری ساخت که به وی امکان می‌داد که بین قسمت تخلیهٔ موتور و تبادلگر گرمایی، یک «میعان‌کننده» بگذارد تا کار مایع کردن را در فشار و در دمای $-140\,^{\circ}C$ به‌جای $-190\,^{\circ}C$ انجام دهد. در سایهٔ این تعبیه، موتور دتانت بسیار رضایتبخش‌تر کار می‌کرد، زیرا از هوای خنک شده $100\,^{\circ}C$ درجه تغذیه می‌شد.

راه‌حلهای ژرژ کلود: همهٔ آن چیزهایی که در رفتار ژرژ کلود غیرمنطقی می‌نمایند، منطقی هستند: دور شدن از دمای $-190\,^{\circ}C$ که فشار و دتانت به‌طور نا به هنجاری مختل می‌شوند و کار مایع شدن در دمای نسبتاً بالا انجام می‌گیرد و برای جبران آن از فشار ۴۰ اتمسفر استفاده می‌شود. در مایع‌کننده، در واقع، هوای فشرده‌ای که در خروجی تبادلگر گرما برداشته شده است بوسیلهٔ هوای دتانت یافتهٔ رانده از موتور، مایع می‌شود. علاوه‌بر اینکه بازده نظری عملیات بهتر از بازده روش لینده است، فشار اولیه ۴۰ اتمسفر به‌جای ۲۰۰ اتمسفر در روش لینده وارد می‌شود. دمای کار موتور، کمتر بالاست و جلوگیری از اتلاف گرما دشواری کمتری دارد.

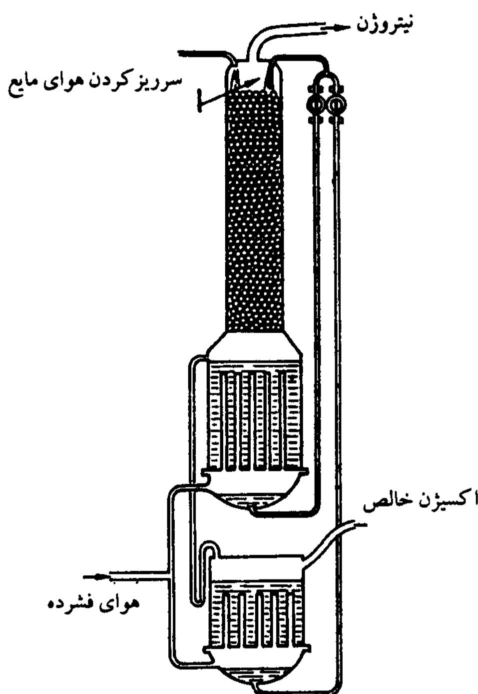


شکل ۵۲.دستگاه دو دتانتی کلود برای مایع کردن هوا.
سمت راست، ماشینی با دو سیلندر. هوای سرد شده بوسیلهٔ یک تبادلگر، طبق نمای شکل ۴۸، وارد سیلندر کوچک می‌شود. این هوا که نخستین دتانت را تحمل می‌کند از درون یک دسته لوله می‌گذرد و نخستین میعان پدید می‌آید. در سیلندر بزرگ نیز همین عملیات انجام می‌شود و دتانت دوم پیش می‌آید و در بخش پایینی دسته لوله‌ها، میعان دوم عملی می‌شود.

روش کلود از همان سال ۱۹۰۶ همراه با وسیله‌ای برای مایع کردن با دتانت مضاعف، مورد استفاده قرار گرفت که باعث بهتر شدن شرایط کار این ماشین می‌شد (شکل ۵۲).

در سالهای بعد، آقایان کلود و لینده، هر دو برای بهتر کردن روشهای تبخیر جزء‌به‌جزء و تقطیر دوبارهٔ دو جزء متشکله به‌طور جدا از هم به دلایلی که گفته آمد، کوشیدند. لینده در سال ۱۹۰۲ دستگاهی را به راه‌انداخت که به وی امکان می‌داد اکسیژن خالص به‌دست آورد (شکل ۵۳). کمی بعد ژرژ کلود یک وسیلهٔ تبخیر و تقطیر دوباره طرح کرد که همزمان، نیتروژن و اکسیژن خالص تهیه می‌کرد (شکل ۵۴). فیزیکدانان دیگری و ازآن‌میان آقای پیکتت در همان زمان برای همین مسأله راه‌حلهای دیگری اندیشیدند که از راه‌حل لینده زیاد دور نبود، اما آقایان پیکتت و کلود بودند که نوآوران عمده‌ای در این تکنیکها به‌شمار می‌آیند.

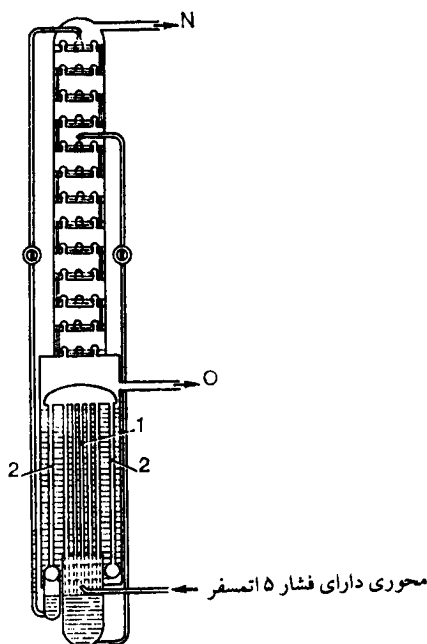
تسخیر تکنیک سرمای صنعتی برای گشایش فاز تازهٔ تحول شیمی صنعتی، یک عامل اساسی بود. این مطلب بعدها بازگو خواهد شد.



شکل ۵۳.دستگاه لینده برای جدا کردن اکسیژن خالص (۱۹۰۲).
این سیستم، دو مدار تبخیر دارد. هوای فشرده‌ای که باید مایع شود از راه لوله‌های پایینی سمت چپ وارد می‌شود. نخستین مرحلهٔ غنی‌سازی در تبادلگر میانی انجام می‌گیرد. بخارهای اکسیژن و نیتروژن در ستون بالایی از اکسیژن غنی شده‌اند. مداری از گازهای مایع شده بوسیلهٔ لوله‌های خارجی، از بالا به پایین در بخش بالایی و از پایین به بالا در بخش پایینی ایجاد می‌شود. اکسیژن خالص تبخیر شده از پایین و سمت راست، و نیتروژن ۷٪ از بالا و سمت راست خارج می‌شوند.

الکترولیز در صنعت

شرایط راه‌اندازی: دومین روش فیزیکی تولید، که در اواخر سدهٔ نوزدهم در اختیار صنعت شیمی قرار گرفت، الکترولیز بود. این روش برطبق روالی فنی ـ اقتصادی شبیه روالی که در کاربرد سرمای صنعتی دیدیم تکامل یافت. همان مرحلهٔ مقدماتی گردآوری اطلاعات علمی، نظری و تجربی در این روش هم دیده می‌شود. طی این مرحله، کاربرد الکترولیز دقیقاً وجود داشت و حتی برای



شکل ۵۴. دستگاهی برای جدا کردن اکسیژن و نیتروژن از یکدیگر.
در بخش پایینی، یک تبادلگر گرما ۱ در اکسیژن مایع قرار دارد. اکسیژن مایع، در لوله‌های میانی راست، تبخیر می‌شود. مخلوط گازی که در ستون تقطیر بالایی که از نیتروژن غنی است جریان دارد در لوله‌های ۲ مایع می‌شود و از طریق لوله‌های بیرونی سمت چپ، به بالای دستگاه باز می‌گردد و نیتروژن خالص از آنجا از راه لولهٔ سمت راست فرار می‌کند.

گالوانوپلاستی تطبیق داده شد.

اما وسایل استفاده از آن در یک برنامهٔ وسیع صنعتی تا مدتها وجود نداشت. مرحلهٔ رفع محاصره، خصلت ویژه‌ای داشت. برای سرد کردن و جداسازی گازهای هوا، دیده شد که دو رشته فعالیت، بدون ارتباط با یکدیگر، این مرحله را پشت سر گذاردند. اینها از یکسو، پراتیک ساخت ماشینهای یخسازی، و ازسوی‌دیگر، ادامهٔ پژوهشهای فیزیکی دربارهٔ مایع کردن گازهای دائم بودند. در مورد الکتروشیمی می‌توان گفت که، حادثه‌ای بتنهایی یک برنامهٔ صنعتی را به پیش راند، و آن استفاده از دینامهای برگشتپذیر به‌جای مگنتهای دارای آهنربای دائم برای تولید جریانهای قوی برق بود.

چنین شباهتی در کار راه‌اندازی الکترولیز هم دیده می‌شود. صنعتگران یا فیزیکدانان متعددی، بزودی دریافتند که الکترولیز چه فوایدی دارد و در مدت کوتاهی، انواع دستگاههای الکترولیز ساخته شد. بااین‌حال، فراورده‌هایی که از این راه به‌دست آمد، به مدت بیست سال، جز سود مختصر اقتصادی، چیز دیگری نداشتند. مؤسسات مختلف این روشها را پذیرفتند، یا اینکه برای کاربرد آن ساخته شدند. اما توسعهٔ واقعی این صنعت، تنها از سالهای ۱۹۲۰ آغاز شد ـ زمانی‌که بویژه کلر، در اثر پیشرفتهای سریع شیمی صنعتی آلی به مادهٔ خام فراورده‌های متعددی تبدیل شده بود.

تأثیر الکترومتالورژی: در سالهای ۱۸۸۰ بود که الکتروشیمی در واقع به‌معنای اعم خود، بسرعت رواج گرفت. در این سالها تولید برق صنعتی آغاز شده بود، اما، متالورژی پیش از بقیه رشته‌ها از آن منتفع شد. تردیدی نیست که موفقیتهای الکترومتالورژی بود که انگیزهٔ کارهای انجام گرفته برای استفاده از الکترولیز در بعضی از رشته‌های شیمیایی شد.

باید گفت که پیش از آنکه برق صنعتی در دسترس قرارگیرد، واکنشهای مهمی از تجزیه بوسیلهٔ برق، تجزیهٔ آب، قلیاها و نمکهای قلیایی و حتی چند طرح کاربردی کاملاً شناخته شده بودند. اما تا زمانی‌که پیل شیمیایی تنها منبع برق قابل استفاده بود، الکترولیز، در رقابت با روشهای شیمیایی تولید، روش بسیار گرانی بود. از این روش، تنها برای تکثیر قطعات هنری، مدالها و الواح تزیینی استفاده می‌شد؛ یا اینکه قطعات زینتی ساخته شده از فلزات معمولی را، بدان وسیله آب نقره یا آب طلا می‌دادند.

در سال ۱۸۳۷ یک معلم مقیم دورپات[۱] در استونی به نام موریتس هرمان یاکوبی روش گالوانوپلاستی را برای اجرای نخستین آبکاری با این روش، یعنی رسوب دادن مس روی قالبهای فلزی یا گچی که با گرافیت مداد اندود شده بودند، اختراع کرد. آقای فاراده قانون مشهوری را که نام وی روی آن است و نیز اصطلاحات خاص مربوط به تأثیر جریان برق روی مایعات را تنها چهار سال زودتر کشف و وضع کرده بود. در سال ۱۸۴۰ آقایان هنری و ریچارد الکینگتن، دست به‌کار آب طلا و نقره دادن با روش الکترولیز شدند.

آنان برای این کار از حمامهای قلیایی و طبق روش جان رایت از سیانور استفاده می‌کردند. آقای هانری دوروئولس هم در فرانسه، در همان سال، مستقلاً روشی برای اجرای همین کارها اختراع کرد؛ روشی که آقای کریستوفل زرگر بی‌درنگ آن را به‌کار گرفت و شهرتی به‌هم رسانید.

خالص کردن مس تا سال ۱۸۶۹ عملی نبود. در فصلهای برق دیده شد که دینام در این زمان بوسیلهٔ گرام اختراع شد که تا حدی برای رفع نیازهای گالوانوپلاستی بود. همین‌که بهای برق

۱. Dorpat: نام قدیم شهر تارتو Tartou در استونی.ـم.

صنعتی بدین‌ترتیب تا سه‌چهارم بهای برق پیل پایین آمد، استفاده از الکترولیز برای تهیهٔ فراورده‌های شیمیایی بی‌درنگ رواج گرفت.

تمامی اطلاعات علمی، هم در کارهای آزمایشگاهی و هم در عملیات صنعتی اولیه ـ که بسیار محدود بودند، کاملاً درنظر گرفته می‌شدند. بدین‌ترتیب، کارهای آزمایشی روی آن گروه از دستگاههای صنعتی تمرکز می‌یافتند که برای ساخت هر یک از تولیدهای جدید مورد نظر لازم شمرده می‌شدند. هدف، ایجاد شرایطی بود که پایین آوردن هرچه بیشتر هزینهٔ تولیدی فراوردهٔ ساخته شده را ممکن سازند. میدان کاربرد الکترولیز در شیمی صنعتی بی‌درنگ شامل تجزیهٔ آب برای تهیهٔ هیدروژن و تجزیهٔ کلرورهای قلیایی یا قلیایی خاکی برای تولیدهای گوناگون: کلر، فلز، باز، فراورده‌های سفیدکننده، کلراتها و ... شد. شاخهٔ اخیر، پیشرفتهای بسیار مهمی داشت.

هیدروژن

الکترولیز آب: دربارهٔ شرایطی که برای الکترولیز آب لازم است، اطلاعات دقیقی در دست است. همه می‌دانند که آب خالص نمی‌تواند الکترولیت باشد و تجزیهٔ آن با جریان برق، زمانی ممکن است که محلولی با مقدار کمی اسید یا باز به آن افزوده شود. کارهای آقای تومازی[1] در ۱۸۸۲ و آقای دوته[2] در ۱۸۸۹ نشان دادند که نتایج تقریباً بی‌اهمیتی که با آب خالص به‌دست می‌آید، تنها برخاسته از واکنش آب با الکترودهای به‌کار رفته است.

نخستین راه‌حل پیشنهادی عبارت بود از اینکه الکترولیز آب در مجاورت ۱/۲۰ اسید سولفوریک انجام گیرد. بااین‌حال، این روش به مدت چند سال درکنج آزمایشگاه‌ها، منزوی ماند زیرا به‌دست آوردن هیدروژن مخلوط ناشده با اکسیژن دشوار بود و یقین نبود که این هیدروژن در شرایط واکنش، باقی بماند؛ وانگهی سود اقتصادی این طرز تولید هم ناچیز بود.

هیدروژن برای بالون: نخستین روشهای دارای خصلت صنعتی، ویژه رفع نیازهای بالونهای جنگی شد. یک ارتش در جبهه باید قطاری از دهها خودرو داشته باشد تا وسایل و فراورده‌های لازم برای تهیهٔ هیدروژن جهت باد شدن یک بالون را در اختیار داشته باشد. برای برطرف ساختن این مشکل، چنین چاره‌اندیشی شد که تنها هیدروژن فشرده را در سیلندرهای فولادی حمل‌ونقل کنند. ارتش انگلستان که در سال ۱۸۸۲ مصر را اشغال کرد، بی‌شبهه نخستین ارتشی بود که از این روش استفاده کرده است.

تهیهٔ هیدروژن از راه الکترولیز ظاهراً نسبت به تهیهٔ شیمیایی آن، که هیدروژن ناخالص تهیه

1. Thommasi 2. Duter

می‌شود، برتری دارد. همچنین شاید ضرور باشد که یک دستگاه الکترولیز ـ که در آن زمان ولتامپر گفته می‌شد ـ را ترکیب کرد تا دو گاز از یکدیگر کاملاً جدا شوند.

یک افسر مهندس فرانسوی، به نام رنار، نخستین کسی بود که در ۱۸۹۰، دستگاه رضایتبخشی را پیشنهاد کرد. وی نخست به‌جای اسید سولفوریک از سود به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کرد. این ابتکار امکان داد تا الکترودهای آهنی یا چدنی به‌جای الکترودهای پلاتینی به‌کار برده شود. سپس میانبند (دیافراگم) پنبهٔ نسوز گذاشت که پایداری آن دربرابر عبور جریان برق از پایداری آجر پوک بسیار کمتر است. ظرفی آهنی محتوی الکترولیت، کاتد دستگاه بود؛ یک لولهٔ مشبک که کیسهٔ بزرگی از پنبهٔ نسوز آن را در میان گرفته بود، آند دستگاه را تشکیل می‌داد. یک باتری مرکب از دو واحد که سه متر بلندی و ۳۰ سانتیمتر قطر داشت و هزینهٔ تولید آن بسیارکم (۲۰۰ فرانک) بود در ناحیهٔ شاله ـ مودون[1] مستقر شد. هر واحد ۱۵۸ لیتر هیدروژن در ساعت تولید می‌کرد. حساب شده بود که قیمت هر مترمکعب گاز از ۶۰ سانتیم بیشتر نخواهد شد. در این محاسبه نه‌تنها هزینهٔ کاردینام، که ماشین بخاری آن را به‌کار می‌انداخت منظور شده بود بلکه هزینهٔ عملیات فشار گاز تا ۱۲۰ اتمسفر نیز به‌حساب آمده بود. دستگاه آقای رنار مدت ده ماه بدون کوچکترین خرابی مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه ساده و محکمی بود و الهام‌بخش دستگاههای دیگری شد که بعدها به‌کار گرفته شدند.

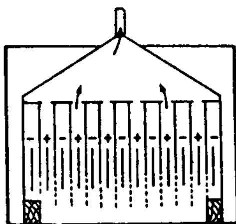
حدود سال ۱۹۰۰ حساب شده بود که با داشتن منبعی از انرژی هیدرولیک، هزینهٔ تولیدی هر مترمکعب این گاز به ۱۰ سانتیم کاهش یابد.

روش دیگری در روسیه احیاناً به‌کار گرفته یا حداقل طرحریزی شد. مبتکر این روش پروفسوری از سن‌پطرزبورگ به نام د. ا. لاچینوف بود که وسیلهٔ خود را در زمانی اعلام کرد که دستگاه رنار شهرتی به‌هم رسانیده بود. اما گرچه در مطبوعات آن زمان از این دستگاه زیاد نام رفته است، هیچ اطلاع دقیقی از آن در دست نیست.

آغاز کاربرد صنعتی: طی پنج یا شش سال پایانی سدهٔ نوزدهم، الکترولیز آب مورد استفاده چندین مؤسسه صنعتی نظیر: Société oxhydrique در بروکسل، Schukert که به Electrizitätgesellschaft در منطقه هانائو[2] واقع در هسه ـ ناسائو[3] تغییر نام داده بود، شد. وسایل مورد استفادهٔ آنها، با وسایل آقای رنار تفاوت چندانی نداشت. الکترولیت، همیشه محلول رقیق سود بود. دستگاه الکترولیز به حجره‌های مرتبط با یکدیگر تقسیم شده بود و میانبندها از

1. Chalais-Meudon 2. Hanau

۳. Hesse-Nassau: ایالتی که در سال ۱۸۶۸ از اتحاد هسه‌ـناسائو و فرانکفورت تشکیل شد.



شکل ۵۵.دستگاه الکترولیز گاروتی؛ برای الکترولیز آب در بروکسل.

ورق آهن مشبک ساخته می‌شد و هرکدام، گازها را به‌سوی ناقوسی در بالا هدایت می‌کردند تا در آنجا جمع‌آوری شوند. (شکل ۵۵).

در مرحلهٔ نخست کاربرد صنعتی، اکسیژن و هیدروژن را برای استفاده در جوشکاری اکسهیدرونی (جوشکاری با اکسیژن ـ هیدروژن) به‌کار می‌گرفتند. بعدها با آغاز سنتز آمونیاک، هیدروژن به یک مادهٔ خام بسیار سودمند تبدیل شد. اما منبع اصلی آن گاز آب بود که طرز تهیهٔ آن را بخوبی می‌دانستند و مخلوط کردن آن با گاز ضعیف گازساز، پس از تصفیهٔ آن از اکسید کربن و گاز کربنیک با نسبتهای دلخواه، چنانکه بعدها خواهیم دید، کاری بسیار آسان بود. تنها زمانی‌که سنتز آمونیاک گسترش زیادی یافت مؤسساتی که در جوار منابع انرژی هیدرولیک قرار داشتند به استخراج هیدروژن آب به هدف استفاده اقتصادی دست زدند و بدین جهت از حمل‌ونقل زغال در محلهای تولید هیدروژن، ساخت کوره و عملیات تصفیهٔ گاز پرهیز داشتند.

یک کاربرد بسیار ویژهٔ الکترولیز که از همان آغاز این صنعت عملی می‌شد، تصفیهٔ آبی بود که برای مصرف خانگی تهیه می‌شد. در این کار از اکسایش الکترودهای آهنی استفاده می‌شد. این الکترودها را افقی و به‌طور پیچ و خمدار قرار می‌دادند و قسمتهای آن را از بالا به پایین جریان پیوسته‌ای از آب می‌شست. اکسید آهن، مواد آلی را به‌شکل یک تودهٔ ژلاتینی در یک ظرف جمع‌آوری می‌کرد و هیدروژن تشکیل شده فرار می‌کرد درحالی‌که مواد جامد در آب معلق می‌ماندند. حدود سال ۱۹۰۰ شرکت Stanley Electric Co آب آشامیدنی فیلادلفی را با همین روش تصفیه می‌کرد.

کلرورها، کلر و قلیاها

شرایط الکترولیز کلرورهای قلیایی یا قلیاییهای خاکی در حدود سال ۱۸۸۰ در سایهٔ پژوهشهای آزمایشگاهی که پس از آغاز این سده در همه‌جا ادامه داشت، بهتر از الکترولیز آب شناخته شده بود. بکرل در سال ۱۸۴۳ الکترولیز در محلول آبی را برای تهیهٔ کلر و سود پایه گذارد. چند آزمایش نیز نشان دادند که الکترولیز گرم، بسته به دمای آن، کلرات پتاسیم یا هیپوکلریت می‌دهد. اما همهٔ اینها تا زمانی‌که وسیلهٔ تولید برق ارزان وجود نداشت در تولید صنعتی کاربردی نداشتند.

چنین می‌نماید که برخلاف نخستین کاربردهای دیگر برق، الکترولیز نمکها با تأخیری نسبتاً طولانی پانزده تا بیست سال در شیمی صنعتی به‌کار گرفته شد. در اوایل کار میلی به تولید کلر و سود وجود نداشت زیرا از طرز تولید آن با روشهای شیمیایی، که مستلزم داشتن تأسیسات بسیار مهم و نیز پرهزینه، اما بسیار بادوام بود آگاهی داشتند. وانگهی، کلر، به زحمت، چند کاربرد باصرفه یافته بود. در واقع این کار بیشتر دست‌وپاگیر بود و تا سال ۱۹۲۰، زمانی‌که کلر به مادهٔ خام بسیار پرمصرفی تبدیل شد پابرجا ماند.

رنگبری خمیر کاغذ: کاملاً روشن و منطقی است که نخستین کاربردهای صنعتی در رشتهٔ تهیهٔ حمام بیرنگ کردن بوسیلهٔ الکترولیز، در داخل خود دیگ تهیهٔ فراورده‌هایی باشد که متحمل این عملیات شیمیایی هستند، مثلاً خمیر سلولوز یا نخهای بافندگی. در سال ۱۸۸۲ چند آزمایش انجام گرفتند اما بزودی کنار گذاشته شدند. نخستین روشی که در کاغذسازی به‌کار گرفته شد از آن ارمیت[1] بود که در سالهای ۱۸۸۵ تا ۱۸۹۰ خود را وقف این کار کرده بود. اساس کار او استفاده از محلول کلرور سدیم و کلرور منیزیم بود. در چرخهٔ واکنشها، منیزیم مکرر به‌کار می‌رود. عملیات در دستگاه الکترولیز شامل یک ردیف صفحات روی انجام می‌گیرد که این صفحات روی یکدیگر می‌گردند و تشکیل کاتدهایی می‌دهند که آندهای نعل اسبی بین آنها در محلول غوطه‌ور می‌باشند.

کاغذسازان فرانسوی این روش را بی‌درنگ پذیرفتند و گویا مدت بیست سال آن را به‌کار می‌گرفتند تا روشهای دیگری جانشین آن شدند.

کلرات و مواد منفجره: در همان دورانی که این تکنیک به‌کار گرفته می‌شد با الکترولیز کلرور سدیم، تهیهٔ صنعتی کلراتهای قلیایی و هیپوکلریتها آغاز شد. کلراتها، بویژه سود و پتاس از میانه سدهٔ نوزدهم، پس از آزمایشهای شوم سدهٔ هجدهم، در ساخت مواد منفجره به‌کار گرفته می‌شدند. روش الکترولیز از همان آغاز ساده‌تر از روش شیمیایی نشان داده شد. در روش اخیر، که در سال ۱۸۴۲ بوسیلهٔ لیبیک شرح داده شده است کلر را روی آهک اثر می‌دهند، سپس یک تجزیهٔ مضاعف بین کلرات

1. Hermite

کلسیم و کلرور پتاسیم، انجام می‌گیرد. اما در واکنش نخست، برخلاف آزاد شدن کلر در داخل محلول کلرور، واکنشهای اکسایش به‌وقوع می‌پیوندند که به تشکیل کلرات پایان می‌یابند.

این روش تولید، بی‌درنگ در سال ۱۸۸۶ درکارخانه‌ای در ولایت اواز، در ویلر ـ سن ـ سپولر[۱]، کمی بعد در والورب[۲] واقع در سن میشل دو مویرین[۳] و سرانجام در شد[۴] پیاده شد. در زمان جنگ جهانی اول نام آن به مادهٔ منفجره‌ای بر پایهٔ کلرات پتاسیم، شدیت، گذارده شد که در محل آن را می‌ساختند.

دستگاه الکترولیز آقایان گال[۵] و مونتلور[۶] در همان مرحلهٔ نخست خود، تقریباً در همه‌جا پذیرفته شد. این دستگاه یک میانبند متخلخل، کاتدی نخست از ورق آهن و بعداً از آلیاژ آهن ـ نیکل، و آند آن در آغاز از پلاتین و بعداً پلاتین ایریدیم‌دار بود. این آند، ورقهٔ بسیار نازکی بود که روی یک شاسی آهنی قرار داشت. ظرف الکترولیت نخست ازگدازه‌های منطقه ولویک[۷] ساخته می‌شد، که بعدها آن را از چوب با آستری از سرب تهیه می‌کردند، خانه‌های دستگاه همچون یک باتری عمل می‌کردند و هر خانه با اتصال موازی تغذیه می‌شد.

آقای کوربن[۸] که در سال ۱۸۹۰ یک دستگاه الکترولیز درکارخانهٔ کاغذسازی برژس کارگذاشته بود برای ساختن کلرات، در ناحیهٔ شد از همان روش استفاده کرد. بین الکترودهای اصلی تعدادی صفحات فلزی به‌طور قائم و عایق نسبت به یکدیگر قرار داشتند که طبق پدیدهٔ بسیار آشنایی در نقش الکترودهای واسطه‌ای دو قطبی بودند. سیستم کوربن متحمل دستکاریهای فراوانی شد و اساس آن مبهم است. یکی از دشواری اصلی آن، رسوب الکترولیتی یکنواخت در همهٔ سطح جرم بود.

تهیهٔ کلر: تهیهٔ کلرات در همهٔ کشورها بی‌درنگ رواج گرفت و معمولاً در نواحی تولید انرژی هیدرولیک تمرکز یافته بود. به‌طورکلی تهیهٔ آن بستگی به ساخت هیپوکلریتها، سود، کلر و پرسلها (نمکهای پراسیدها)، پرسولفاتها، پرکربناتها و پرکلراتها داشت. به‌دست آوردن کلر، چه از راه الکترولیز محلول کلرور، چه با الکترولیزکلرور مذاب در سالهای ۱۸۹۲ ـ ۱۸۹۸ رواج گرفت. اما از زمان ویلیام کوک، در ۱۸۵۱ و چارلز وات در همان سال، تعدادی اختراعات در رابطه با روش و دستگاههای تهیه کلر در بسیاری از جاها به ثبت رسید.

تهیه کلر از راه الکترولیز همیشه وابسته به تهیهٔ اجسام متعدد دیگری، چه باز و هیدروژن و چه

1. Viller-Saint-Sépulere 2. Vallorbe 3. Saint-Michel-de-Maurienne 4. Chedd
5. Gall 6. Montleur
۷. Volvic: دهستانی در ولایت پویی دو دوم فرانسه.
8. Corbin

هیپوکلریتها، زمانی‌که عملیات با محلول نمک، کلرور سدیم یا کلرور پتاسیم انجام می‌گرفت، بود؛ و نیز طرز هدایت آن، زمانی‌که از جریان برق برای مذاب نگاه داشتن نمک استفاده می‌شود، بستگی به نوع فلز قلیایی داشت.

پس از اندک مدتی دانستند که نوع واکنشها در محلول بسیار پیچیده است زیرا هیدروژنی که در اثر واکنش فلز بر آب به‌وجود می‌آید می‌تواند ترکیبات تشکیل شده را احیا کند. اما همهٔ این مشکلات با کاربرد دستگاههای الکترولیزی دارای میانبند یا دارای کاتد جیوه‌ای، آسان برطرف شدند.

مجموعهٔاطلاعات به‌دست آمده، حل مشکلات نظری مربوط به مشخصات جریان برق، ولتاژ و آمپراژ، و بازده‌هایی که می‌توانند توقع داشته باشند را بسیار ساده کرد. کاربرد تئوری در عمل، سبب شد که دشواریهای دیگری در زمینهٔ نوع میانبند، وضع آن نسبت به الکترودها، شکل کلی دستگاههای الکترولیز و بالاخره نوع الکترودها پدید آیند. حل این مشکلات با در نظرگرفتن وسایلی که در اختیار سازندگان این زمان بود، فی‌نفسه چنان دشوار نبود. آنان انواع راه‌حلها را مطرح کردند، اما تنها آزمایش می‌توانست بهترین آنها را برگزیند. پس از چهار یا پنج سال تجربه، بین سالهای ۱۸۹۰ تا ۱۸۹۵ انواعی از دستگاههای الکترولیز ساخته شدند که چندین ده سال اهمیت داشتند.

جنس میانبند: یکی از مشکلات میانبند که سبب شد انواع فراوانی از آن ساخته شود انتخاب جنس آن بود. کار میانبند در دستگاه الکترولیز، جدا کردن فیزیکی فراورده‌های تجزیهٔ الکتروشیمیایی: کلر در آند، سود در کاتد و در همان زمان، جداسازی هیدروژن است تا از واکنشهای فرعی جلوگیری شود.

همان‌طورکه در مبحث تهیهٔ هیدروژن از آب دیدیم، میانبند میان آند وکاتد همچون سد متخلخلی عمل می‌کند. در کاربردهای صنعتی که با مقادیر بسیار بزرگی سروکار داریم میانبند باید پاسخگوی تقاضاهای زیر باشد: یونهای آزاد شده را در جهتی که برق هدایت می‌کند از خود بگذراند؛ دربرابر جریان برق مقاومتش بسیار ضعیف باشد؛ در برابر اثر خورندگی الکترولیتها و فراورده‌های تجزیهٔ آنها، پایدار بماند.

مصالح موجود می‌بایست مورد آزمایش و بررسی قرار گیرند و از میان آنها یکی را برگزینند. پس از اندک زمانی دانسته شد که مصالحی که تا آن زمان در آزمایشگاه‌ها یا جاهای دیگری به‌کار گرفته شده‌اند از جنبهٔ شیمیایی مقاومت زیاد ندارند و پس از مدتی فرسوده می‌شوند. این مصالح عبارت بودند از: پارشمن، پنبهٔ نسوز، سیلیکاژل که در مدتی کوتاه تکه‌تکه می‌شدند.

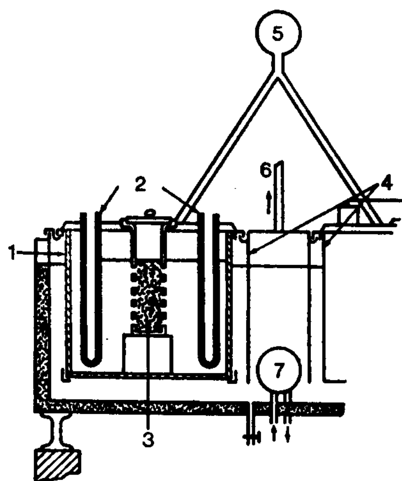
نخست کوشیدند تا مشکل را برطرف سازند و بدین‌منظور در جریان کار الکترولیز، لایه‌ای از

اکسی‌کلرورهای کلسیم و منیزیم را بر سطح پارشمنی که به‌عنوان میانبند به‌کار گرفته می‌شد، نشست دادند. برای این کار، مقدار کمی از کلرورهای کلسیم و منیزیم به الکترولیت افزودند. این روش ظاهراً مدتی حدود بیست سال از ۱۸۸۵ ـ ۱۸۸۶ در آلمان به‌کار می‌رفت.

آزمایشگران دیگری باز در آلمان و در همان سالها، ازیکطرف آقای برئوئر[1]، در ۱۸۸۴ و از طرف دیگر آقایان ماتز[2] و وبر در ۱۸۸۶ از نوعی مواد معدنی استفاده کردند که مخلوطی از سیمان، نمک دریا و اسید کلریدریک بود که به‌شکل صفحاتی درآمده بود و پیش ازکاربرد، مدت زیادی آن را شسته بودند. آقایان اوتنن ـ شالاندر[3] نیز در سال ۱۸۹۰ از سیمان برای ساختن میانبند دستگاه الکترولیزی استفاده کردند که تا مدتها در فرانسه فعال بود و لوله‌های سیمانی در آن بعدها با لوله‌های سرامیکی سیلیکو ـ آلومینی (حدود ۱۹۲۸) عوض شدند. نمونهٔ دیگری ازکاربرد چنین مصالحی، استفاده ازکاسه‌های شیشه‌ای یا چینی بود که درون یکدیگر گذاشته می‌شدند و ملاطی متخلخل از الیاف پنبهٔ نسوز آنها را از یکدیگر جدا می‌کرد. این سیستم که ابتکار آقای گرین‌وود در سال ۱۸۸۸ بود بزودی در انگلستان و کمی بعد در امریکا به‌کار گرفته شد.

انواع میانبند: این مصالح و ترکیبات فراوان دیگری برای ساخت میانبندهای عمودی یا مایل که بین دو الکترود، در الکترولیت گذاشته می‌شدند و کاتد یا آند را در میان می‌گرفتند، به‌کار گرفته شدند. چنین دستگاه الکترولیزی که بعدها، سلول با دیافراگم غوطه‌ور نامیده شد، معایب پیشین را باز در خود داشت که از آن جمله، کاهش تدریجی بازدهٔ جریان برق، افزایش واکنشهای فرعی در قسمت آند آب و نیز کاتد آب بود (شکل ۵۶). باز در همین زمان، آقایان لوسوئور[4] در امریکا (سال ۱۸۹۱) و، کارمایکل[5] در آلمان (سال ۱۸۹۴) نوعی دستگاه الکترولیز ساختند که دارای یک ظرف مایل یا افقی بود که میانبند موازی با کف ظرف گذاشته می‌شد. در اینجا دیده می‌شود که باز، نخست از الیاف کاغذ پارشمنی، سپس از الیاف پنبهٔ نسوز که نمکهای معدنی، سولفات باریم آن را در میان گرفته‌اند استفاده شده است. این مصالح روی یک توری سیمی، که همان کاتد است، در ظرف الکترولیت جای دارند. ناقوسی که حامل آند است بالای ظرف آویزان است. هم الکترودها و هم میانبندهای افقی کاملاً در الکترولیت غرقه شده‌اند، در این شرایط، سود و هیدروژن در قسمت پایین و کلر از لایهٔ مایع نسبتاً اسیدی گذشته زیر ناقوس جمع می‌شود. لایهٔ میانی که میانبند و کاتد در آن است، خنثی می‌ماند (شکل ۵۷). این دستگاه، بیست سال بعد در آلمان متحمل اصلاحاتی شد و شکل نهایی خود را به‌دست آورد. از جمله برتریهای این دستگاه،به‌دست

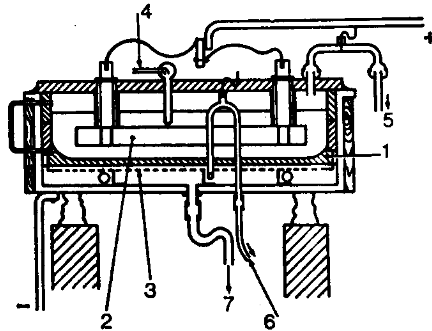
1. Breuer 2. Matthes 3. Outhenin-Chalandre 4. Le Sueur 5. Carmichael



شکل ۵۶.دستگاه الکترولیز با میانبند شناور، برای الکترولیز کلر و پتاسیم.
یک محفظه دارای عایق گرما، که از یک میانبند غوطه‌ور ۱، که درون آن آند ۲هایی از جنس مگنتیت گذاشته شده‌اند و ظرف مشبکی ۳ محتوی کلرور پتاسیم تشکیل شده است. این دستگاه یک کاتد آهنی ۴، یک راه فرار کلر ۵ و راهی برای فرار هیدروژن ۶ و نیز لوله آلاتی ۷ برای گرم کردن با بخار دارد.

آمدن محلول غلیظتری از سود، و بازدهی در ردیف ۹۵٪ از جریان است.

سرانجام، باز در همان زمان، آقای هارگریوز، نوع دیگری دستگاه الکترولیز طرح کرد. کار او نتیجهٔ بررسی سنجیده‌ای از سال ۱۸۹۰، نخست با همکاری تامس برد، دربارهٔ همهٔ روشهای الکترولیز در آن زمان بود. وی پس از مرگ برد، نخستین اختراعات خود را با ذکر هر دو نام به ثبت رسانید و یک شرکت انگلیسی در سالهای بعد آن را عملی ساخت. پایهٔ کار وی ساختن ظرف با دیواره‌هایی از میانبند عمودی مجاور یک توری مسی، در نقش کاتد دستگاه بود. میانبند در این دستگاه، نسبت به کاتد که غوطه‌ور نبود، نقش صافی را داشت. در فضای بین این دو، جریانی از گاز کربنیک و بخارآب که با میعان خود تماس کاتد ـ آند را تأمین می‌کرد، گردش داشت. آندها در وسط ظرف بودند و با پر کردن قسمت بیشتر حجم، کار به پایان می‌رسید. جزئیاتی از این دستگاه در زیر آورده می‌شود: کاربرد الیاف پنبهٔ نسوز در لفافی از سیلیکات سدیم برای میانبند، تقویت کاتد با یک شبکه فلزی پشتگیر، الحاق میانبند به کاتد. شکل و تشکیلات آند طی کاربرد، به‌طور محسوسی متحول



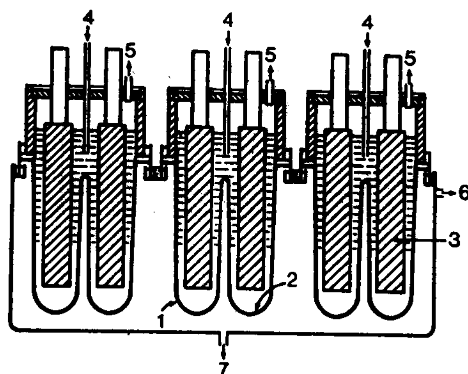
شکل ۵۷.دستگاه الکترولیز با میانبند افقی؛ برای الکترولیز نمک محلول.
در این شکل، میانبند ۱، آند گرافیتی ۲، کاتد آهنی ۳ دیده می‌شوند. محلول کلرور سدیم از لوله ۴ وارد می‌شود. کلر از ۵ و هیدروژن از ۶ و سود از ۷ خارج می‌شوند.

شدند. انواع دیگری از دستگاه الکترولیز که بر همین اصل صاف کردن سود بوسیلهٔ میانبند ساخته شدند در سال ۱۹۰۰ پیاپی به نمایش گذارده شدند. همهٔ این دستگاهها بازده جریان بسیار بالایی، حدود ۹۷٪ داشتند. خلوص کلر آنها، بیشتر از دستگاههای دیگر بود و محلول سود آنها غلیظتر (شکل ۵۸).

الکترودها: مسألهٔ ساخت الکترودها نیز بسیار سریع حل شد. کاتدها در تماس با کف قلیایی، بی‌درنگ با صفحات مشبک تشکیل پنجره‌ها یا توریهای سیمی می‌دادند، و خراب نمی‌شدند.

اما در مورد آندها، که دستخوش خورندگی کلر هستند، مسأله، به‌شکل دیگری است. بهترین مصالح برای آندها، پلاتین بود بشرطی که مقادیر مهمی که برای باتریهای الکترولیز لازم است و چندین مترمربع پهنه دارند زیاد گران تمام نمی‌شدند. بااین‌همه، گاه‌گاهی از پلاتین، به‌شکل خالص یا آلیاژ با ایریدیم، برای سی یا چهل سال استفاده شد؛ و زمانی هم کوشیدند که به‌جای آن از فلزات معمولی پوشیده با ورقهٔ نازکی از پلاتین استفاده کنند ـ روشی که تا کنون گویا ناموفق بوده است.

زغال چوب از همان آغاز کار، با اینکه کاربرد آن دشوار بود، جسم بسیار خوبی شناخته شد. پایداری آن دربرابر تأثیر شیمیایی کلر، در واقع به حالت فیزیکی و دستکاری سطح آن بستگی دارد. زغال قرع که آقای بونزن از سال ۱۸۴۲ در پیلی که نام خود وی را دارد آن را به‌کار می‌برد بی‌درنگ خود را بسیار ناپایدار نشان داد. همچنین به مدت ده سال، همهٔ تکنسین‌هایی که دستگاه الکترولیز می‌ساختند، هر یک بنوبهٔ خود فرمولهایی برای اصلاح زغال ویژهٔ ساخت آند پیشنهاد



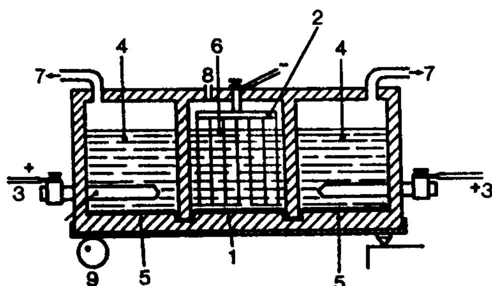
شکل ۵۸.دستگاه الکترولیز با میانبند صافی کربس؛ برای الکترولیز نمک محلول.
مجموعه‌ای از چند دستگاه الکترولیز است که هرکدام دارای کاتدی از ورق مشبک آهن ۱، میانبندی از پنبهٔ نسوز که درون کاتد جای دارد۲، آند از گرافیت اچیسن۳ است.نمک طعام محلول از مجرای ۴ وارد می‌شود، کلر از مجرای ۵، هیدروژن از ۶ و سود محلول از ۷ خارج می‌شوند.

کردند و همگی این فرمولها در جهتی بودند که بیشترین همگنی ممکن، به جرم داده شود. این روشها اساساً براین‌پایه بودند که زغال را، که مخلوطی از چند مادهٔ زغال شدنی بود، در معرض پختهای کم‌وبیش طولانی و گاهی مکرر قرار دهند.

سرانجام آقای اچیسن امریکایی، مخترع کربوراندم، در سال ۱۸۹۹ ـ ۱۹۰۰ بهترین روش را، با پخت مضاعف زغال در مجاورت اجسام گوناگون ارائه کرد. با این روش زغالی مناسب آند بادوام زیاد (سه تا هشت ماه) به‌دست می‌آید. زغال اچیسن از همان آغاز به رایجترین جسم در الکترولیز کلرورها تبدیل شد؛ گرچه بعدها اجسام دیگری نیز آزمایش شدند.

دستگاههای الکترولیز بدون میانبند: برای برطرف ساختن مشکلات میانبند و حذف همهٔ واکنشهای فرعی کلرور سدیم با الکترولیت، بزودی چنین اندیشیدند که کاتد را جیوه‌ای بسازند تا سدیم در آن به‌شکل ملغمه، متناسب با آزاد شدن از الکترولیت، حل شود. نخستین اختراعاتی که در این‌باره به ثبت رسیدند در سال ۱۸۹۲ در انگلستان به نام کاستنر[1] و در آلمان به نام کلنر بودند. این اختراعات بی‌درنگ توسط شرکتی که این دو نفر تأسیس کردند به‌کار گرفته شدند. دستگاههای آنها بسیار مشابه بودند، گرچه آقای کلنر در آغاز نوعی دستگاه الکترولیز مختلط طرح کرده بود که دارای یک کاتد جیوه‌ای و میانبندها بود. گویا این دستگاهها پس از اندک مدتی کنار گذاشته شدند.

1. Castner



شکل ۵۹.دستگاه کاستنر با کاتد جیوه‌ای؛ برای الکترولیز نمک طعام محلول.
کاتد جیوه‌ای ۱ پنجرهٔ آهنی تغذیهٔ کاتد ۲، آند زغالی ۳، دو بخش محتوی آب‌نمک ۴، لایهٔ ملغمهٔ سدیم ۵، ظرف تجزیهٔ ملغمه، تشکیل سود ۶، خروج کلر ۷، خروج هیدروژن ۸، چرخک همزن.

این دستگاهها بر پایهٔ استفاده از ظرفی سه بخشی بود که جدارهای آنها بدون اینکه با کف ظرف تماس داشته باشند در جیوه فرو رفته بودند. کار الکترولیز در دو بخش مجاور یکدیگر، هرکدام با آندی انجام می‌گیرد. بخش وسط تنها آب و محلول رقیق قلیا را دریافت می‌کند. این ظرف دارای توازن منظم است و جیوه از یک بخش به بخش دیگر گردش می‌کند. ملغمه در تماس با آب موجود در بخش وسط تجزیه می‌شود (شکل ۵۹).

روشهای کاستنر و کلنر، امتیاز سادگی را داشت، یعنی بهای تمام شدهٔ فراورده زیاد بالا نبود. آنها پس از مدت کوتاهی، همه روشهای پیشنهادی دیگر را، که گردش جیوه در آنها با وسایل مکانیکی پیچیده‌ای انجام می‌گرفت و در نتیجهٔ اتلاف جیوهٔ زیاد داشتند، از میدان بیرون کردند. وسایلی که جانشین آنها شدند، با این ظرف سه‌بخشی تفاوت بنیادی نداشتند و تنها چند تفاوت جزیی در آرایش «پیل» تجزیهٔ ملغمه و گردش جیوه و ملغمه دیده می‌شد.

اهمیت جدید کلر: کلر که درگذشته، فراوردهٔ فرعی مزاحمی بود در اواخر سدهٔ نوزدهم به مادهٔ خام بیش‌ازپیش مورد نیاز صنایع شیمی تبدیل شد. افزایش این تقاضا در زمان کاربردهای نخستین صنایع الکترولیز کلرورها، درحدی بود که بتواند پژوهش روشهای متعددی که در سالهای ۱۸۸۵ تا ۱۹۰۰ بشدت دنبال می‌شدند و نیز سرمایه‌گذاریهایی را که تأسیسات جدید می‌طلبیدند توجیه کند. کلر برای نخستین بار در سال ۱۸۸۸ بوسیلهٔ BASF به بازار آمد. از این زمان به بعد آن را به‌شکل مایعی که، به کمک تجهیزات میعانی که آقای ر. کنیچ برای همین کار اندیشیده بود، تحویل می‌دادند. این روش پیاپی و منظماً تکمیل شده است.

گازی که در دستگاههای الکترولیز جمع می‌شود، کمی گازکربنیک و هیدروژن، و مقدار زیادی بخارآب دارد. برای بی‌آب کردن این روش، که کلاسیک شده بود، از برجهای تغلیظ سنگ‌ماسه‌ای استفاده می‌کردند. و اسید سولفوریک را به‌شکل قطرات باران از بالا در برجها می‌ریختند. برای میعان کلر، دو روش به‌کارگرفته شدند: پایین آوردن دما با دتانت گازکربنیک در مارپیچی که مارپیچ گردش کلر را احاطه کرده است، و در شورابی که در $-25^{\circ}C$ نگاهداری می‌شود غوطه‌ور است؛ فشار را به ۸ تا ۱۰ اتمسفر بالا برده و سرد می‌کنند. هر دو روش از سالهای نخستین سدهٔ بیستم به‌کارگرفته شدند.

اما در سالهای جنگ جهانی اول بود که تهیهٔ کلر با روش الکترولیز بخاطر نیاز فراوان به آن برای ساخت گازهای جنگی: کلر، فسژن، ایپریت، گازهای دودزای، گسترش فراوان یافت.

پس از جنگ، تبدیل فراورده‌های این صنایع به فراورده‌های دیگر آسان می‌نمود. تحویل کلر مایع در بطریهای فولادی و بزرگ و حتی در واگنهای مخزنی در محل کاربرد، لزوم در اختیار داشتن و تولید پیوستهٔ تأسیسات نسبتاً دست‌وپاگیر این مادهٔ شیمیایی را، که کاربرد آن غالباً گاه‌گاهی بود، حذف کرد.

آمده است که مصرف کلر مایع نسبت به مصرف کلر در آلمان از ۹٫۷٪ در ۱۹۱۳ به ۱۷٪ در ۱۹۱۹ و به ۳۰٪ به ۱۹۲۲ رسید. در فرانسه، همین درصد در سال ۱۹۳۰ به ۲۴٫۸ و در ۱۹۶۷ به ۴۲٫۶ رسید، درحالی‌که مصرف کل آن در همین دوران از ۲۹۰۰۰ به ۷۶۶۰۰۰ تن بالغ شد.

دلیل اهمیت اقتصادی جدید کلر در این نیم سده، همانا کاربرد صنعتی ترکیبات آلی برای تهیهٔ فراورده‌های بسیار گوناگون است. این عنصر در تهیهٔ ترکیبات اساسی برای ساخت حشره‌کشها، لیزانه‌ها، مایعات ضدیخ، مایعات سردکننده، ترکیبات ضدکوبش (بنزین)، حلالها، الیاف مصنوعی، مواد پاکساز، مواد سنتزی از انواع مختلف و غیره دخالت دارند. ترکیبات معدنی آن نیز در رشته‌های گوناگون شیمی صنعتی تأثیر کمتری ندارند. علاوه‌بر مشتقات سیلیسیمی آن که در سال ۱۹۴۵ همراه با سیلیکونها گسترش چشمگیری یافت، نمونهٔ دیگری، مثلاً تیتان، می‌تواند نشان دهد که چگونه دسترسی آزاد به یک جسم، کلر، سبب شکوفا شدن یک شاخه از صنعت می‌شود که تا حدود سال ۱۹۴۰ اساساً وجود نداشته است. از زمانی‌که احیای کلرور تیتان بوسیلهٔ منیزیم عملی شد کاربردهای صنعتی تیتان به‌طور جهشی توسعه یافتند. درگذر ده سال ۱۹۴۷ ـ ۱۹۵۶ تولید جهانی تیتان از ۲ به ۳۵۰۰۰ تن رسید.

فلزهای قلیایی: کاربرد اخیر الکترولیز صنعتی، تهیهٔ فلزهای قلیایی با روش الکتروشیمیایی، با کمی تأخیر نسبت به‌روشهای تهیهٔ کلر، قلیاها و ترکیبات گوناگون آنها، پدید آمد.

روشهای کاستنر و کلنر برای الکترولیز محلول آبی با کاتد جیوه‌ای، برای تهیهٔ فلز با تقطیر ملغمهٔ جیوه، به‌جای عمل آوردن با آب، مدت چند سال رواج داشتند. از آنجا که تقطیر تدریجی موجب اتلافهای پرخرج جیوه بود، در ممالک متحدهٔ امریکا، حدود سالهای ۱۹۰۲ ـ ۱۹۰۴ و کمی پس از آن در آلمان پیشنهاد شد که ملغمه را در دستگاه دومی که در آنجا، ملغمه نقش آند را دارد، الکترولیز کنند.

در همان دوران، الکترولیز ترکیبات مذاب را با استفاده از یک کاتد مایع که از یک فلز معمولی، مثلاً سرب، کادمیم یا قلع تشکیل می‌شد آزمایش می‌کردند. اما این گرایشها کمی بعد در صنعت کنار گذاشته شدند، زیرا تجزیهٔ آلیاژ به‌دست آمده دشواریهایی پدید می‌آورد.

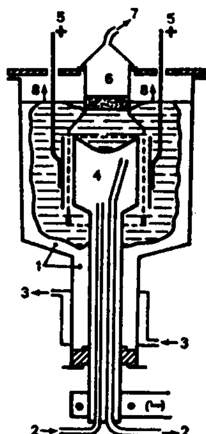
وانگهی در بیش از ده سال پیش از آن، در ۱۸۹۰، آقای کاستنر توانسته بود از سود مذاب، بین الکترودهای جامد، سدیم را استخراج کند. این روش در چند سال تکمیل شد و تا کلریدها بسط یافت. شرایط نظری الکترولیتهای مذاب را آقای ر. لورنتس آلمانی، بعداً، در ۱۹۰۵ بررسی کرد. در این زمان یکنوع دستگاه صنعتی در مؤسسات گوناگون مورد استفاده قرار می‌گرفت.

کارهای تحقیقی پس از شروع پراتیک، عملیات تکمیلی دستگاه را با به‌دست آوردن اطلاعاتی دربارهٔ افزایش رسانایی برقی ترکیبات در اطراف نقطهٔ ذوب آنها و نیز تعدادی واکنش جانبی در الکترولیت و باز دربارهٔ انحلال‌پذیری فلزات در الکترولیت و غیره، جهت دادند.

دستگاه شامل ظرفهای آهنی یا چدنی بود که در موقع الکترولیز، از آنجا که خطر انفجار هیدروژن، که در کاتد با سدیم آزاد می‌شود و اکسیژنی که در آند متصاعد می‌شود، در میان بود، پس از اندک مدتی، ظرفیت دستگاه را بسیار محدود کردند (شکل ۶۰). برای الکترولیز کلرورها، این ظرفها را از زغال یا از آجر نسوز می‌سازند، زیرا کلر آزاد می‌شود (شکل ۶۱).

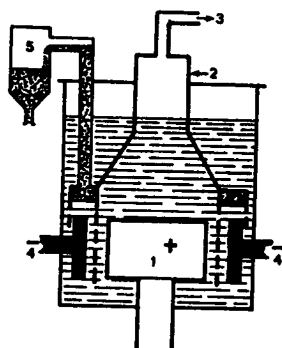
الکترودهای فلزی برای سود مناسب هستند، اما برای کلرورها، آند طبعاً باید از زغال چوب باشد. در هر دو مورد، از همان گامهای نخستین، برای اینکه فلز در سطح الکترولیت، نزدیک ظرفی که برای گردآوری آن است، جمع می‌شود، باید از میانبند استفاده شود. با اینکه باید با گذرانیدن برق، الکترولیت را در حالت مذاب نگاه داشت، لازم است وسایلی جهت گرم کردن کاتد پیش‌بینی شود تا به‌هنگام توقف دمای عملیات، جرم بسته نشود.

الکترولیز پتاس در سال ۱۹۰۹ عملی شد اما گویا بیشتر از الکترولیز کلرور پتاسیم، در تهیهٔ



شکل ۶۰.دستگاه الکترولیز سود مذاب.

سود مذاب با لایه‌ای از سود جامد ۱، پوشیده می‌شود. جریانی از گاز ۲، نوک کاتد را گرم، و جریانی از آب سرد ۳، پایین آن را خنک می‌کند. میانبندی که بین کاتد ۴ و آند ۵، گذاشته شده است سدیم را به سطح الکترولیت ۶ می‌راند. هیدروژن از ۷ و اکسیژن از ۸ فرار می‌کنند.



شکل ۶۱.دستگاه الکترولیز تحت فشار؛ برای الکترولیز کلرورهای قلیایی مذاب.

ناقوسی آهنی ۲، در بالای آند ۱ قرار دارد تا کلر در ۳ جمع شود. میانبندی که بین آند و کاتد ۴ گذاشته شده است، سدیم را به‌طرف مخزن ۵ راهنمایی می‌کند.

صنعتی این فلز به‌کار گرفته نمی‌شد. در واقع پتاسیم در مجاورت هوا آسانتر از سدیم اکسید می‌شود و تجهیزات لازم برای تهیهٔ آن بسیار پیچیده هستند.

کاربرد سدیم در صنعت: درگذر این سده، سدیم بنوبهٔ خود، مادهٔ خام مهمی در صنایع شیمی شده بود. مدتهای زیاد، از زمان کشف آن بوسیلهٔ هامفری دیوی در ۱۸۰۷ تا کارهای سنت ـ کلر ـ دوویل روی آلومینیم در ۱۸۵۰، هیچ کاربرد صنعتی نداشته است. روش احیای آلومین بوسیلهٔ سدیم به پیدایش فراورده‌ای، آلومینیم، انجامید که بسیار گران بود، بهای سدیم در آن زمان تا بیش از ۱۰۰۰ فرانک بالا رفته بود. اما کنجکاوی در مورد این فلز جدید انگیزهٔ کارهای متعددی برای بهتر کردن شرایط تهیهٔ سدیم فلزی و نیز پایین آوردن قیمت تولیدی آن شد. حدود سال ۱۸۹۰، پیش از صنعتی شدن الکترولیز، این قیمت تا پنج فرانک طلا[۱] پایین آمد.

کاربرد روشهای الکترولیزی، نخست امکان پذیرفتن سدیم به‌عنوان عامل تهیهٔ آلومینیم را فراهم آورد. اما این فلز قلیایی همهٔ اعتبار اقتصادی خود را هم از دست نداد، بلکه برعکس، الکترولیز سود، و بعدها کلرور مذاب آن موجب به بازار آوردن جسمی قابل استفاده برای تهیهٔ فراورده‌های متعددی نظیر سیانید و پروکسید سدیم و وارد کردن آن به شکلی بسیار باصرفه‌تر در تهیهٔ اندیگوی مصنوعی شد. همین کارها توسعهٔ الکترولیز مذاب را سبب شدند.

اما براساس یک پدیدهٔ کاملاً آشنای برگشت، بازارهای تازهٔ سدیم، سبب شدند که سودآوری روشهای شیمیایی تولید آن، که از نخستین کاربردهای الکترولیز مذاب، از دست رفته می‌نمود، باز گردد. احیای هیدروکسید، سود یا نمکهای متعدد به توسط عوامل گوناگون نظیر کربن، سیلیسیم، آهن، بتنهایی یا جمعی، کاربرد خلأ جزیی، انگیزهٔ پیدایش ردیفی طولانی از روشهای شیمیایی قابل استفاده در صنعت شدند. اما الکترولیز باز هم، مهمترین وسیلهٔ تولید آن باقی ماند.

در جریان سالهای ۱۹۱۰ ـ ۱۹۵۰ به برکت پیشرفتهای سنتز آلی، سدیم به یک عنصر مورد استفاده در تعداد بی‌شماری از صنایع، بویژه برای ساخت عطرها و داروها و نیز به‌عنوان فلزی سودآور، نظیر بعضی فلزات کمیاب، همچون اورانیم، تیتان، زیرکونیم و غیره، پس از جنگ جهانی دوم، تبدیل شد.

هرچند که کاربرد پتاسیم بسیار محدود بود، این فلز سریعاً در بعضی از صنایع، مثلاً در ساخت سلولهای فوتوالکتریکی مقامی یافت.

بدین‌ترتیب، دیده شد که الکترولیز در صنایع شیمیایی، یک وسیلهٔ نیرومند تولیدی است که مرحلهٔ نوین توسعهٔ صنایع شیمیایی بر شانه‌های آن قرار دارد.

---

۱. franc-or نام فرانک فرانسه از سال ۱۹۲۸ تا ۱۹۵۹، که ظاهراً قابل تبدیل به طلا بود.ـم.



صنعت نوین نیتروژن

در دههٔ پایانی سدهٔ نوزدهم، صنعت شیمی به دو شاخهٔ بزرگ تقسیم شده بود: صنعت معدنی و صنعت آلی. این تقسیم‌بندی، بازتابی از خود رشتهٔ شیمی بود که به دو شاخهٔ شیمی معدنی و شیمی‌آلی تقسیم می‌شد. جدایی این دو شاخهٔ صنعتی، کمتر از شاخه‌های علم شیمی از یکدیگر بودند. در ابتدا، عمل آوردن فراورده‌های شیمی‌آلی، بشدت تحت تأثیر روشهای شیمی معدنی بود. نمونه‌های بسیار گویای این ادعا، راه‌اندازی روش مجاورتی اسید سولفوریک و افزایش تولید اسید نیتریک، دقیقاً جهت رفع نیازمندیهای مربوط به‌کار برد روشهای تازهٔ عمل آوردن مواد آلی یا مشتقات آنها بود. اگر به کتابهای شیمی صنعتی آن دوره مراجعه شود، در اینکه صنایع شیمی‌آلی، بخش کاملاً جداگانه‌ای را تشکیل می‌دادند تردید خواهند کرد. حتی در کتابهای آغاز این سده که در آستانهٔ جنگ جهانی اول انتشار یافته‌اند، صنایع شیمی‌آلی بیش از یک‌چهارم کتاب را اشغال نکرده‌اند و بیشترین صفحات مربوط به صنایع سنتی: صابون‌پزی، صنایع نشاسته، رنگها و صنایع تکمیل و ... است؛ و طبعاً فراورده‌های مربوط به سی یا چهل سال پیش ـ رنگهای مصنوعی، دینامیت، باروت بیدود و مشتقات نیتروژندار سلولوز ـ مورد بحث قرار گرفته‌اند. اما دربارهٔ فراورده‌های

بسیار اخیر، مثلاً سیانید و کاربرد آن در تولید آمونیاک، و نیز اکسایش نیتروژن در کورهٔ قوسی، از دو یا سه صفحه بیشتر صحبت نشده است. نویسندگان این کتابها هنوز اطلاعات کافی نداشتند و غالباً روشهای نوین، لااقل جزئیاتشان مدتها محرمانه می‌ماند. جزوه‌ها و رساله‌ها، متعدد هستند اما تنها نوشتارهای مبهم و ناکاملی را تشکیل می‌دهند. ازسوی‌دیگر، نتایج صنعتی نامطمئن هستند. هرگز از آزمایشهای نخستین سنتزهای کاتالیزورگری تحت فشار، سخنی به میان نیامده است.

زمانی‌که به کتابهای سالهای ۱۹۰۰ تا ۱۹۱۴ مراجعه کنیم بخوبی احساس می‌شود که صنعت شیمی هنوز همان صنعت شیمی سدهٔ نوزدهم است. متالورژی، به‌معنای دقیق واژه، معمولاً بیشتر کتاب را فراگرفته است و بقیه به تولیدهای کلاسیک اسیدها و ترکیبات معدنی، مربوط می‌شود. نویسندگان دربارهٔ این موضوعها، با آب‌وتاب چیز نوشته‌اند، زیرا تکنسین‌های شیمی در تکمیل روشهایی، گاهی با کهنگی صد سال، لحظه‌ای را از دست نداده‌اند. مبحث جدیدی که تکمیل وسایل را ممکن می‌ساخت کاربرد دمها، برجهای تبخیر یا میعان، تبادلگرهای حرارتی در انواع گوناگون بود. چنین احساس می‌شود که این نویسندگان، جز شرح چند صنعت شیمی‌آلی، که دیگر کلاسیک شده بودند برای بیان فراورده‌های دیگر، آمادگی ندارند و کتابهای آنها رفته‌رفته از حالت کتابهای صنعتی خارج، و به کتابهای شیمی‌آلی تبدیل شده‌اند و روشهای مشروح در آنها، در اکثر موارد، فراتر از کارهای آزمایشگاهی نیستند.

تنها در نیمه نخست سدهٔ بیستم است که تمیز میان این دو شاخهٔ صنعتی شیمی بتدریج برجسته می‌شود، و بویژه درگذر دو دهه ۲۰ و ۳۰، که برههٔ میان دو جنگ جهانی است این امر زیاد چشمگیر است. این پدیده در سالهای نخستین این سده، با تکمیل روشهای فیزیکوشیمیایی سنتزهای صنعتی ترکیبات نیتروژنی آغاز شد و با کاربرد این روشها در جنگ جهانی اول و گسترش آنها بلافاصله پس از جنگ تثبیت یافت. انگیزهٔ تازه‌ای پدید آمده بود و بتدریج که روشهای عمل آوردن فیزیکوشیمیایی فراورده‌های نفتی تکمیل و بسط یافتند. این انگیزه همه‌جاگیر شد.

روشهای تولید آمونیاک

فراوانی نیتروژن در جوّ زمین، سهولت نسبی تهیهٔ هیدروژن با وسایل سنتی، بزودی انگیزهٔ آزمایشهایی برای ترکیب این دو عنصر و به‌دست آوردن مستقیم آمونیاک شد. نخستین گامها در این راه گویا آقای فردریک کولمن، صنعتگر فرانسوی برداشت که در ۱۸۳۸ به فکر افتاد با اکسایش مستقیم آمونیاک، اسید نیتریک بسازد. صنعتگران دیگری به‌دنبال وی رفتند، آنان از کف پلاتین به‌عنوان

کاتالیزور استفاده کردند. آقای شارل تلیه نخستین کسی بود که در ۱۸۶۵ روشی را به ثبت رسانید که طبق آن، این واکنش تحت فشار انجام می‌گرفت. شیمیدانهای دیگری کوشیدند تا از قوس برقی یا تخلیهٔ آن استفاده کنند.

نیاز محدود به آمونیاک: تا پیش از نخستین دههٔ سدهٔ بیستم هیچ نتیجهٔ صنعتی به‌دست نیامد. موانع موجود، گوناگون بودند. نخست اینکه آمونیاک با کندی زیاد به مرحلهٔ سودآوری رسید. تقاضا برای آمونیاک منحصر به صنایع حاشیه‌ای بود که تنها مقادیر کمی از آن‌را آن‌هم به شکل نمک، مصرف می‌کردند.

نخستین کاربرد صنعتی آمونیاک، همراه با تولید کربنات سدیم بروش سلوی بود. معلوم است که اجرای این روش بسیار دشوار بود. نویسندگان متعددی درپی به‌کار گرفتن آمونیاک، یا نمکهای آمونیم برای تجزیهٔ کلرورسدیم بودند. شکست پیاپی همهٔ کسانی‌که درپی انجام این کار در مقیاس صنعتی بودند، از دایر و همینگ[1] در ۱۸۳۸ گرفته تا بولوار[2] در ۱۸۷۲، یا رقابت چند سالهٔ تولیدهای اولیهٔ سلوی، که نخستین امتیاز آن در سال ۱۸۶۳ به ثبت رسید، و دو کارخانهٔ نخستینی که در سالهای ۱۸۷۲ و ۱۸۷۳ گشایش یافتند نتیجهٔ علل گوناگونی بودند که از همه مهمتر قیمت تولیدی شوراب نمک دریا بود. به‌نظر نمی‌رسد که قیمت تولیدی آمونیاک یا نمکهای آن در آن زمان یک مانع اصلی بوده باشد.

در واقع در اواسط سدهٔ نوزدهم، منابع آمونیاک ارزان، به ناگهان فراوان شد. آمونیاک به‌طور سنتی، از سدهٔ هجدهم، از تقطیر میزه آب و مدفوع حیوانات، از تکلیس استخوان، شاخ یا بعضی مواد تخمیری تهیه می‌شد. دو صنعت تازه، در آغاز این سده، آمونیاک را به شکل فراوردهٔ جنبی تهیه می‌کردند. ساخت قند چغندر که کنجاله‌های تقطیر شده در مجاورت آهک، آمونیاک تولید می‌کرد، در آغاز، منبع قابل توجهی بود، اما اهمیت آن در برابر عمل آوردن آب آمونیاکی به‌دست آمده از تقطیر زغال‌سنگ، محدود باقی‌ماند. تهیهٔ ککهای متالورژی و نیز ساخت گاز روشنایی، بسرعت در ردیف منابع غنی این فراورده جای گرفتند. و تا میانهٔ سده بیستم این مقام را حفظ کردند.

تولید آمونیاک و نمکهای آن از نظر اقتصادی تا مدتها اهمیت صنعتی زیادی نداشت. زمانی‌که روش سلوی برای تهیهٔ کربنات سدیم مورد بهره‌برداری قرار گرفت، این فراورده‌ها توجه صنعتگران را به خود جلب کردند. در این دوران، ۱۸۷۰ ـ ۱۸۸۰ نخستین دستگاههای سردکننده نیز به خدمت گرفته شده بودند. وانگهی دیده می‌شود که ساخت آمونیاک از راه سنتز، زمانی ممکن شد که دستکاری گاز مایع و تحت فشار در صنعت رواج گرفت.اما برای نیاز تنهای صنعت سرما، مانند

1. Hemming 2. boulevard

صنعت سود سلوی، مصرف آمونیاک نسبتاً محدود باقی ماند، زیرا این ماده در جریان ساخت یا کار ماشین، گردش داشت.

زمانی‌که مصرف کودهای ازتی در کشاورزی آغاز شد، نیتراتها از رگه‌های طبیعی آمریکای جنوبی به اروپا وارد شد و آمونیاکی که از آبهای تقطیری زغال‌سنگ به‌دست می‌آمد برای تهیهٔ سولفات آمونیم کاملاً کافی بود.

دشواریهای سنتز صنعتی ترکیبات‌دیگر نیتروژن و بویژه اسید نیتریک نیز، در سایهٔ روشهای آشنایی به‌دست می‌آمدند. با وجود افزایش سریع نیاز به آنها در دهه‌های پایانی سدهٔ نوزدهم، عرضه کافی باقی‌ماند. قطعی است که این نیازهای جنگی طرفین متخاصم در اروپا، که دست آنها از ذخایر نیتراتهای طبیعی کوتاه شده بود، انگیزهٔ تلاش فراوان برای تولید صنعتی روشهایی بود که در آغاز مخاصمات، بتازگی روبراه شده بودند: تهیهٔ مستقیم اکسیدهای نیتروژن، اکسایش آمونیاک برای تولید اسید نیتریک، تهیهٔ آمونیاک برای سیانامید کلسیمی، و بعدها برای سنتز مستقیم و تحت فشار.

وانگهی، تا پایان سدهٔ نوزدهم، شیمیدانها از روشهای علمی مربوط به تعیین شرایط دما، فشار، عبور گازها و جذب فراورده‌های عملیات فیزیک و شیمیایی که برای رسیدن به بازده مطلوب دارای کاربرد صنعتی لازم بودند چیزی نمی‌دانستند. رشتهٔ شیمی فیزیک، نخستین قوانین بنیادین خود را تا آغاز نیمه دوم سدهٔ نوزدهم ارائه نکرده بود. نخستین کاربرد واقعی مجموعهٔ این اطلاعات برای حل یک مسألهٔ شیمی صنعتی، دقیقاً، بررسی آقای هانری لوشاتلیه در سال ۱۹۰۱ دربارهٔ واکنش تعادلی در ترکیب مستقیم نیتروژن با هیدروژن بود. این بررسی را شیمیدانهای آلمانی: والترنرنست، بعداً فریتس هابر و همکارانش تکمیل کردند.

سرانجام، آخرین مانع تولید صنعتی روشهای مستقیم در سدهٔ نوزدهم، یک مسألهٔ تکنیکی بود، و آن تهیهٔ هر دو عنصر نیتروژن و هیدروژن، با خلوص رضایتبخش و هزینهٔ معقول یعنی کاری بود که در زمین ما، ظاهراً بسادگی انجام یافته است. این مانع، زمانی برطرف شد که صنعت سرما که آقای شارل تلیه آن را پایه گذارده و لینده آن را تکمیل کرده بود وسایل لازم برای جداسازی این گازها را با استفاده از میعان و تقطیر تدریجی ایجاد کرد.

نیتروژن می‌توانست مستقیماً از جوّ گرفته شود، اما هیدروژن تنها با تکامل دستگاههای گازساز، که برای موتورهای گازی، سوخت تهیه می‌کردند و پیدایش روشهای تجزیهٔ الکترولیزی آب، می‌توانست در دسترس قرار گیرد.

پژوهشهای تکمیل روشهای تثبیت مصنوعی نیتروژن، به مدت سه‌چهارم سده ادامه یافت.

بررسی دربارهٔ این مسائل، می‌توانست شیمیدانهای متخصص در فیزیولوژی گیاهی را، به هم نزدیک کند.

درکار تثبیت نیتروژن جوّ، این نکته جالب است که روشهای گوناگونی تقریباً همزمان با نخستین مرحلهٔ کاربرد صنعتی آنها شناخته شدند و برپایهٔ روش شیمیایی به توسط سیانامید کلسیک (۱۹۰۴ـ۱۹۰۵)، اکسایش قوس برقی (۱۹۰۴)، اکسایش آمونیاک (۱۹۰۸) و بالاخره، سنتز کاتالیزوری آمونیاک (۱۹۱۰ـ۱۹۱۳) قرار داشتند.

سیانامید: همان‌طورکه دیدیم، اختراع کورهٔ دارای قوس برقی، بوسیلهٔ مواسان در ۱۸۹۲، روشی برای تولید صنعتی کاربید، ترکیبی که بی‌درنگ، کاربردهای فراوانی یافت، به‌دست داد.

آقای فرانک و کارو، فیزیکدانان آلمانی، برای تهیهٔ سیانید کلسیم، از راه جذب نیتروژن بوسیله کاربید اندیشیدند. در حقیقت، از حدود نیم سده پیشتر، آزمایشهای متعددی نشان داده بودند که در شرایطی کربناتهای پتاسیم و باریت، نیتروژن گازی را تثبیت می‌کنند و بخشی به سیانور تبدیل می‌شوند. در سال ۱۸۶۰ آقایان مارگریت و سوردوال[1] شیمیدانهای فرانسوی، این پژوهشها را تا تولید آمونیاک از راه تأثیر بخارآب روی سیانید باریم به پیش بردند. این روش بدلیل هزینهٔ بالای سوخت و فرسوده شدن سریع کوره، کاربرد صنعتی نیافت. پس از آن، پژوهشهای متعددی، بویژه با کاربرد سدیم و حتی آلومینیم انجام گرفت، که گویا از لحاظ اقتصادی نتیجهٔ رضایتبخشی داشتند؛ اما، زمانی، که این توفیق اعلام شد، مسألهٔ تثبیت صنعتی نیتروژن از راههای دیگر حل شده بود.

آقایان فرانک و کارو پس از اینکه کاربید به قیمت مناسبی در دسترس قرارگرفت، درصدد کاربرد آن به‌عنوان مادهٔ خام در تهیهٔ سیانور کلسیم برآمدند. مسائل پیچیده‌ای، مانند سرعت و تعادل واکنش در ارتباط با دما و حضور نمکهایی به‌عنوان کاتالیزور مورد بررسی قرارگرفت؛ اما این دو شیمیدان اظهار داشتند که واکنش جذب، سیانید مورد نظر را تولید نمی‌کند بلکه نمک کلسیم سیانامید می‌دهد که ترکیبات ناپایداری ازکربن و نیتروژن است که آقایان کلوئه[2] و کانیزارو در سال ۱۸۵۱ آن را تولید و توصیف کرده‌اند.

سیانامید کلسیم فراورده‌ای است که تحت تأثیر آب، آسان به کربنات آمونیاک و حتی آمونیاک تبدیل می‌شود. نخستین تبدیل، در خاک پدید می‌آید و این زمانی است که سیانامید به‌عنوان کود به‌کار رفته است؛ و دومین، در مرحلهٔ عمل آوردن آن درگرما و فشار با بخارآب است.

تبدیل به آمونیاک: آقایان فرانک و کارو که به خواص این ترکیب جدید علاقه‌مند شده بودند با یاری مؤثر آقای روت[3]، که در ساخت به آنان کمک می‌کرد و فراودنتال[4] به مدت ده سال، پژوهش

1. Sourdeval 2. Cloës 3. Roth 4. Freudenthal

آنان را دنبال کردند تا بتوانند تولید آن را صنعتی کنند. چنین می‌نماید که نخستین کارخانهٔ ساخت این فراورده، بوسیلهٔ پولتسنیوس[1] در آلمان گشایش یافت و سیانامید به‌عنوان کود حدود سالهای ۱۹۰۳ یا ۱۹۰۴ به بازار آمد.

گروه فرانک و کارو در همان دوران کارخانه‌ای در ایتالیا برپا داشت و چند سال پس از آن کارخانه‌های دیگر درکشورهای آلمان، ممالک متحدهٔ امریکا، کانادا، نروژ و فرانسه تأسیس شدند. آنها در نزدیکی مراکز هیدرولیک ساخته شدند تا بتوانند از جریان برق برای کوره‌های قوسی تولیدکنندهٔ کاربید استفاده کنند.

جزء سازندهٔ دیگر، که نیتروژن است از هوا به‌دست می‌آمد و اکسیژن باید حذف می‌شد. جذب اکسیژن هوا بوسیلهٔ مس گرم، کاری نسبتاً آسان بود، اما لازم بود که اکسید مس را با جریانی از گاز آب دارای خواص احیاکننده، بازیابی کرد. به علت هزینه گزاف و دشواری نسبی کل کار، تولید فراوان نیتروژن ممکن نبود.

سرانجام، بروش فیزیکی میعان هوا و سپس تقطیر جزءبه‌جزء آن روی آوردند، زیرا از سال ۱۸۹۶ دستگاه لینده که کاربرد آن برای جدا کردن اکسیژن از نیتروژن، رواج روزافزونی داشت در دسترس بود. چند سال بعد، روش ژرژ کلود در اغلب جاها جانشین دستگاه لینده شد. مسائل دیگری که به بازده انرژی و تجهیزات دستگاه تقطیر جزءبه‌جزء برای تهیهٔ نیتروژن خالص ربط داشتند نیز باید حل می‌شدند.

روش جداسازی فیزیکی، گرچه با تولید نیتروژن دارای بیش از ۹۹٫۵٪ خلوص به نیازهای تولیدی جدید پاسخ می‌داد، بعضی از صنعتگران، از جمله پولتسهنیوس، بعدها برای اینکه نیتروژن دارای کیفیت برتر به‌دست آید، بروش شیمیایی روی آوردند. نوعی گاز پست با درصد کم اکسید کربن تهیه کردند و اسید کربنیک را با گذرانیدن آن از یک مایع قلیایی یا هوا، جذب کردند. برای تکمیل خلوص، آن را از محلول آمونیاکی کلرور کویورو گذرانیدند.

ترکیب سیانامید کلسیم به‌عنوان کود بازار گسترده‌ای به‌دست آورد اما رقابت کودهای شیمیایی دیگر، آن را محدود کرد. این ترکیب در نقش مادهٔ خام برای تولید آمونیاک در اثر نیازهای شدید به آمونیاک در زمان جنگ جهانی اول، کاربرد وسیعی داشت. بااین‌همه کارخانه‌های متعددی در جهان برای تولید این ترکیب، در چند سال پیش از آغاز جنگ، برای ساخت آماده بودند.

تثبیت نیتروژنی که با خلوص قابل قبول به‌دست آمده بود، روی کاربید، کاری نسبتاً آسان بود. این عمل می‌بایست با کمک گرم کردن کاربید در حدود ۷۰۰ درجه انجام می‌گرفت. سپس،

1. Polzenius

کار گرم کردن پایان می‌یافت و حرارت موجود، ادامهٔ واکنش را تأمین می‌کرد. برای تولید پیوسته یا همچنین گسستهٔ این ترکیب، راه‌حلهای گوناگونی وجود داشت که تفاوت اساسی آنها، در شکل کوره‌ها و تجهیزات لازم برای تأمین بهترین تماس کاربید جامد و نیتروژن گازی بود. تجزیهٔ سیانامید کلسیم در آمونیاک، و کربنات کلسیم نیز با چند دستکاری در عمل برای تأثیر دادن آب در دمای مناسب روی سیانامید، با بازده بالا نیز آسان شده بود.

اسید نیتریک سنتزی

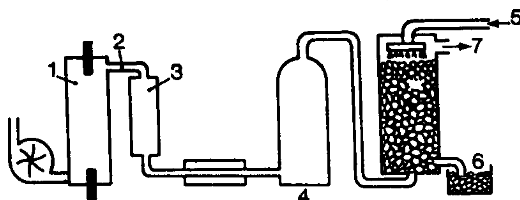
اکسایش نیتروژن

واکنش اکسایش نیتروژن تحت تأثیر جرقهٔ برقی از پایان سدهٔ هجدهم شناخته شده بود و حتی مادام لوفور فرانسوی در سال ۱۸۵۹ برای تولید اسید نیتریک آن را به ثبت داده بود. اما مرحلهٔ حقیقی این کار که به ساخت صنعتی آن کشیده شد تا دههٔ پایانی سدهٔ نوزدهم، آغاز نشد. بررسیهای آقایان ا. پرو ساکن ژنو و مارسلن برتلو درگذشته نشان داده بودند که طول جرقه و بویژه توان آن، در بازده کار مؤثر می‌باشند.

آقای ف. ا. گوی[1] فیزیکدان ساکن ژنو در سالهای ۱۸۹۵ ـ ۱۸۹۶ همهٔ شرایط لازم را برای اینکه واکنش با بازده رضایتبخشی انجام شود تعیین کرده بود. این واکنش، از نوع اکسایش بسیار پیچیده‌ای است، زیرا نه‌تنها برگشت‌پذیری است، بلکه همچنین به این علت که نتیجهٔ واکنشهای تعادلی دیگری بین اکسیدهای گوناگون نیتروژن، اکسیژن و خود نیتروژن است. پس از گذشت بیش از ده سال از کارهای گوی و همکارانش، فیزیکدانان و شیمی‌دانان متعددی در باز کردن این کلاف سردرگُم کوشیدند و حدود سالهای ۱۹۱۰ ـ ۱۹۱۳ بود که این پدیده کاملاً شناخته شد. در پرتو همین موج پژوهشی، واکنشهای نیتروژن با هیدروژن، و آمونیاک با اکسیژن نیز روشن شدند.

اما بسیار پیش از اینکه همه‌چیز در تئوری روشن گردد، امتیازهایی به ثبت رسید و کارهایی برای عملی کردن انجام گرفت. نخستین اطلاعات، حدود سال ۱۹۰۰ صنعتگران را راهنمایی می‌کرد که در کوره‌ای کم حجم کار کنند تا مخلوط گازی، در حقیقت، هوا، به‌طور یکنواخت به دماهای بالا ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه برسد، و بی‌درنگ گازها را درکورهٔ برقی به جریان اندازند تا هم جوّ کوره پیش از آنکه به حداکثر اکسیدهای نیتروژن، حدود ۵٪، برسد تجدید شده باشد و هم اینکه این اکسیدها تحت تأثیر تخلیهٔ برقی قرار نگیرند، زیرا اثر آن تجزیهٔ سریع این اکسیدهاست. گازهایی که درحال خروج ازکوره هستند باید بی‌درنگ خنک شوند. تغییر شکل اکسیدها تا مرحلهٔ جذب آنها

1. Ph.A.Guye



شکل ۶۲.نمایهٔ ساخت اسید نیتریک با اکسایش مستقیم نیتروژن.
کمپرسوری هوا را به درون کورهٔ برقی ۱ می‌دمد. گازها با دمای ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه خارج می‌شوند ۲. دیوکسید نیتروژن در ۳ تا ۵۰۰ درجه خنک می‌شود و در ۴ به پروکسید تبدیل می‌شود. گازها در یک برج جذب‌کننده بالا می‌روند و در رأس آن به جریان آب ۵ می‌رسند. اسید نیتریک در ۶ خنثی شده است. ماندهٔ گازی از ۷ فرار می‌کند.

در آب و تشکیل اسیدنیتریک پیش می‌رود (شکل ۶۲).

قوسهای دمیدهٔ برقی: نخستین واحد صنعتی در سال ۱۹۰۲ در ممالک متحدهٔ امریکا در جرزی سیتی[1] به‌توسط شرکت Atmospheric Products Co تأسیس شد. این شرکت برای استفاده از حق امتیاز آقای برادلی و لاوجوی[2] تشکیل شده بود. این واکنش در یک کپسول استوانه‌ای انجام می‌گرفت که در داخل آن تعداد زیادی قوسهای کوچک برقی بین قطبهای پلاتینی ایجاد می‌شد. یکی از جدارهای دایره‌های دارای حرکتی گردشی نسبت به جدار دیگر بود تا مخلوط شدن گازها و قطبهای متعدد قوس تأمین شود این قدم اول، پیشرس بود و توفیقی نیافت.

دیگر شرایط اساسی کاربرد قوس برقی در سالهای بعد، به توسط گوی در سویس و آقای بیرکلند در نروژ، مشخص شدند. این شرایط روشن ساختند که باید قوس را «دمید» تا همهٔ حجم اطاق احتراق را فراگیرد. برای دمیدن به قوس از عبور سادهٔ جریان گاز با سرعت زیاد استفاده شد. این راه‌حلی بود که در تأسیسات صنعتی سالهای ۱۹۵۰ و ۱۹۱۴ بوسیلهٔ شونهر برای BASF و پاولینگ برای شرکتهای آلمانی و اطریشی، و بویژه توسط روسی[3] بعدها در ایتالیا به کار گرفته شد.

این تنها روشی بود که در فرانسه توسط Société de l' Azote، تأسیس در سال ۱۹۱۷، که تولید آن در سال ۱۹۲۰ با استفاده از کوره‌های پاولینگ به بازار آمد ـ به‌کار گرفته شد.

روش دیگری از دمیدن قوس، بوسیلهٔ فیزیکدان نروژی، بیرکلند از یک تجربهٔ پلوکر[4] مربوط به سال ۱۸۶۱ اقتباس شده بود. این تجربه نشان داده بود که یک قوس برقی راستخط تحت تأثیر

۱. Jersey City: شهری در شمال‌شرقی ایالت نیوجرزی، مقابل مانهاتن پایین. ـ م.

2. Lovejoy 3. Rossi 4. Plücker

میدان مغناطیسی، به شکل مسطحی پهن می‌شود. بیرکلند این بررسی را در سال ۱۹۰۳، نخست در آزمایشگاه تکرار کرد. آقای اید[1] یک صنعتگر و کاسب شهر کریستیانا[2] (اسلو) به بیرکلند، اندیشهٔ به‌کار گرفتن این نوع قوس برقی را برای تحقق بخشیدن به اکسایش نیتروژن توصیه، و در همان زمان سرمایه شرکت نیتروژن نروژ را هم تأمین کرد.

این شرکت پس از آزمایشهای نیمه صنعتی، بین سالهای ۱۹۰۴ و ۱۹۱۰ در نروژ کارخانه‌های متعددی برپا داشت که ازآن‌میان کارخانهٔ نوتدن[3] (۱۹۰۵) با ۲۵۰۰ اسب، نخستین کارخانه‌ای بود که فراوردهٔ خود را به بازار عرضه داشت. آقای اید برای تجهیزات مولد جریان سه فازکه یک توربین هیدرولیک از نوع پلتون محرک آن باشد به کارخانهٔ اُرلیکون مراجعه کرد؛ کارخانه هم، بی‌درنگ با BASF در آلمان و چند کارخانهٔ دیگر در اروپا و آمریکای شمالی قرارداد بست.

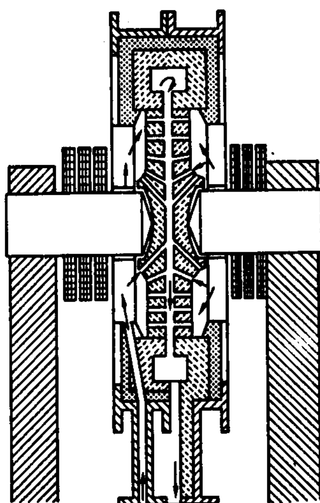
تجهیزات صنعتی: تجهیزات صنعتی این تولید در مرحلهٔ پس از کوره، عبارت بودند از وسایل میعان و تقطیر تدریجی هوا و نیز یک دَم. در واقع پس از مدت کوتاهی از هوای غنی شده از اکسیژن برای افزایش بازده به شکل کیلووات ساعت انرژی مصرف‌شده، استفاده کردند. دَم برای دمیدن سریع هوا در کوره لازم است. خود کوره به شکل استوانه‌ای با قطر زیاد بود، بسیار مسطح، که به‌طور عمودی روی لبهٔ خود گذاشته می‌شد. روکش کوره، محتوی الکترودها بود. سرهای الکترودها با یکدیگر دومتر فاصله داشتند، آهنربای برقی و نوعی آستر نسوز که در آن فضاهای سوخت و کانالهای گردش گازها دیده می‌شوند (شکل ۶۳).

بقیهٔ تجهیزات، بیشتر سیلقه‌ای بودند. برجهای خنک‌کننده، که تبدیل اکسیدها در آن انجام می‌گرفت، برجهای جذب بوسیلهٔ آب و احیاناً ظرفهای خنثی‌کننده با آهک، که از وسایل سفالگری تکنیکهای کلاسیک شیمی صنعتی اقتباس شده بودند. در این مدار، در مخرج کوره یک دیگ بزرگ لوله‌ای گذاشته شده بود تا گرمایی که در تغلیظ محلولهای نیترات آهک از آنها استفاده شده بود بازیابی کند. دمهایی، هوای تازه را به برجهای خنک‌کننده و اکسایش می‌دمیدند.

در کوره‌های برقی وظیفهٔ قوس برقی، تنها ایجاد دمای حدود ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه برای سوخت نیتروژن در سطحی حتی‌المقدور گسترده است. زمانی‌که این تأسیسات شروع به کار کردند، شماری از شیمیدانها در اندیشهٔ ساختن کوره‌هایی برآمدند که با شعله غنی شده از اکسیژن خالص گرم می‌شوند.

چنین می‌نماید که این کارها از مرحلهٔ آزمایش فراتر نرفتند و صرفاً به‌عنوان شاهدی از تلاش در توسعهٔ این زمینهٔ جدید امکانات وسایل صرفاً شیمیایی باقی مانده‌اند. بااین‌همه، دیده شد که

1. Eyde   2. Christiana   3. Notodden



شکل ۶۳.کورهٔ برقی بیرکلند ـ اید برای اکسایش نیتروژن.
برش جانبی کوره در سطح بخش قطبهای آهنربای برقی. قوس برقی در قسمت مرکزی تولید می‌شود. هوا از مجرای پایینی وارد کوره می‌شود و از هواکشهایی که در آسترنسوز کوره است می‌گذرد. هوای گرم از این هواکشها، وارد فضای احتراق می‌شود. مخلوط گازی شامل NO_2 از مجرای مرکزی به‌طرف پایین رانده می‌شود.

در سالهای ۱۹۵۰ در ممالک متحدهٔ امریکا، روشی ازگرم کردن با مصالح نسوز که از تکنیکهای کراکینگ نفت اقتباس شده بودند و دستیابی به دماهای لازم برای سوخت نیتروژن را میسر می‌ساختند در اوضاع و احوال تازه‌ای پدید آمدند.

در همهٔ انواع کوره‌های قوسی که برای اکسایش نیتروژن در بیست سال نخست سده بیستم اختراع شدند، کوره‌های بیرکلند و اید، بسیار کارآمدتر و رایجتر بودند. معاصران آنها از مشخصات تازهٔ یک کارخانهٔ تولید شیمیایی، بی‌سروصدا، تمیز و با تعداد بسیار کم کارگر شگفت‌زده شدند. تنها شکل باقی مانده این بود که در سطح تکنیکهای تولیدی و انتقال برق صنعتی در این دوران، برای اینکه تولید از جنبهٔ اقتصادی مناسب باشد، این کارخانه‌ها باید در نواحی دارای ذخایر انرژی هیدرولیک ساخته می‌شدند.

ظرفیت کارخانه‌های موجود، طی جنگ جهانی اول افزایش یافته بود و کارخانه‌های دیگری

بویژه در سالهای ۱۹۱۷ ـ ۱۹۱۸ تأسیس شده بودند. پس از پایان پذیرفتن مخاصمات، روشهای گوناگونی به مدت پانزده سال تا اندازه‌ای رواج یافتند، اما روشهای اکسایش کاتالیزوری آمونیاک، که راه‌اندازی آنها تنها چند سال از روشهای اکسایش نیتروژن متأخرتر بودند، آنها را از میدان بیرون راندند.

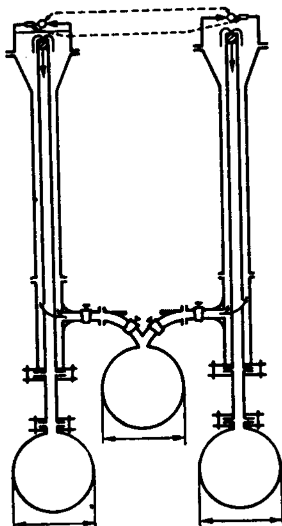
اکسایش آمونیاک

سوخت آمونیاک، از نظر درگیری و ادامه، واکنشی نسبتاً ساده است. ممکن است یا با ازت و آب انجام گیرد که هیچ سودی برای صنعت ندارد، یا در مجاورت کاتالیزور، و دمایی بالاتر از ۶۰۰ درجه با اکسید ازت و آب. اصول کار، همان‌طورکه دیدیم، بوسیله فردریک کولمن شرح داده شده است. آقایان اوستوالد و باوئر شیمیدانهای آلمانی در ۱۹۰۷ این اصول را دقیقاً تعیین کردند و در بسیاری از کشورها، جز آلمان که آنها را فاقد مشخصات نوآوری دانست، به ثبت رسانیدند. روش اوستوالد تقریباً بی‌درنگ در آلمان، در ناحیهٔ گرته[1] نزدیک بوخوم[2] مورد استفاده قرارگرفت، سپس مؤسسات متعددی از آلمان، انگلیس، بلژیک و امریکایی آن را به‌کار گرفتند. در فرانسه نخستین کارخانه، تا سال ۱۹۱۶ در آنگولم، برای کاربرد این روش تأسیس نشد و پس از پایان جنگ بود که تولیدی برابر با تولید گرته در ۱۹۰۹، حدود ۷۰ تن اسید نیتریک عرضه کرد.

پژوهشها از همان سالهای نخستین، در اطراف شکل و آرایش کاتالیزور پلاتینی به‌کار رفته تمرکز یافتند. اوستوالد از برگهای مسطح و موجدار که روی خود پیچیده شده بودند استفاده می‌کرد، شیمیدانهای دیگر توریهای پلاتینی، که بعداً باید نگاهداری می‌شدند، به‌کار می‌بردند. مسأله، به‌دست آوردن بهترین بازده و بویژه تولید هرچه بیشتر با پلاتین ثابت بود. راه‌حلهای گوناگونی برای شکل فضاهای سوخت، مدخل، گذرگاه و نیز اصلاح گازها پیشنهاد شدند.

کنورتیسور اصلی اوستوالد از یک لولهٔ باریک و دراز نیکلی تشکیل می‌شد که درون یک لولهٔ چدنی لعابی گذاشته می‌شد. مخلوط آمونیاک و هوا وارد قاعدهٔ لولهٔ حلقه‌ای می‌شد و در تماس با لولهٔ نیکلی که گازها پس از واکنش، در آن پایین می‌آمدند گرم می‌گردید. در انتهای فوقانی کنورتیسور، مخلوط گازی از روی کاتالیزورگر می‌گذشت و سوخت آمونیاک در یک‌دهم ثانیه عملی می‌شد. درگیری واکنش در لحظهٔ راه انداختن، با گرم کردن کاتالیزور به توسط یک مشعل هیدروژن یا گاز روشنایی ایجاد می‌شد (شکل ۶۴). گرچه اشکال گوناگون کنورتیسور بی‌درنگ طرح شدند که بویژه دارای فضاهای واکنش بسیار وسیع بودند، طریقه درگیری واکنش در همهٔ این سیستمها یکی

1. Gerte 2. Bochum



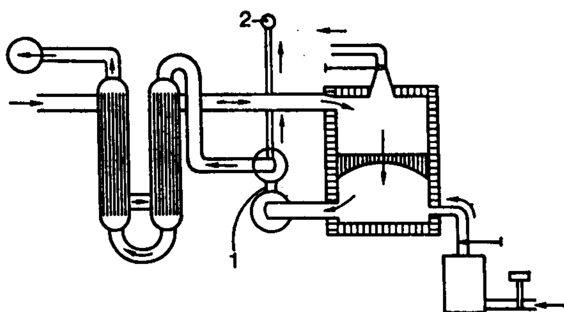
شکل ۶۴.کنورتیسور اوستوالد؛ برای اکسایش آمونیاک در اسید نیتریک
دستگاه دو فضای احتراق عمودی دارد که به‌توسط مجرایی که مقطع آن در مرکز شکل دیده می‌شود با مخلوط گازی (آمونیاک و هوا) تغذیه می‌شوند. گازها با بالا رفتن در قسمت حلقوی هر ستون، گرم می‌شوند. در نوک ستون با گذشتن از روی کاتالیزور، وارد قسمت میانی می‌شوند و برای اینکه از مجراهای واقع در پایین بگذرند، پایین می‌آیند.

بود و گرم کردن با برق، زیاد رضایتبخش نبود.

یک کارخانه شامل، نخست یک واحد تهیهٔ آمونیاک گازی است که مادهٔ خام آن، سولفات آمونیم، سیانامید کلسیمی Ca :N. CN یا یک محلول آمونیاکی ساده است. بخش اصلی این واحد، ستونی با بشقابکهاست که از بالای آن آمونیاک گازی که در یک مخزن گاز، با هوا مخلوط شده است، خارج می‌شود.

بخارهای نیترو پس از عبور از کنورتیسور از تعدادی برجهای اکسایش و جذب، مشابه برجهای کارخانه‌های نروژی اکسایش نیتروژن، می‌گذشتند.

عملی کردن روش: این روش جدید تهیهٔ اکسیدهای نیتروژن، گویا نخست برای تولید بخارهای نیترو مورد نیاز اطاقهای سربی به‌کار گرفته شد. اما برای تهیهٔ اسید نیتریک لازم جهت نیتروژندهی به هیدروکربنهای حلقه‌ای، نخست جهت ساخت رنگهای مصنوعی، سپس، اندکی بعد به علت



شکل ۶۵.کنورتیسور BASF برای اکسایش آمونیاک به اسید نیتریک.
مخلوط گازی (آمونیاک + هوا)، پیش از آنکه به فضای اکسایش (طرف راست شکل) برسد، متحمل دو تبادلگر حرارتی می‌شود. از همان آغاز عملیات، بوسیلهٔ کوره‌ای که گاز پست می‌سوزاند، فضای اکسایش گرم می‌شود (طرف راست و پایین). گازها در کنورتیسور، از بالا به پایین از روی کاتالیزور می‌گذرند و پس از عبور از یک دیگ لوله‌ای ۱ که ۱۲ کیلوگرم بخارآب تولید می‌کند (شروع حرکت از ۲)، خارج می‌شوند، در پایان از دومین لوله‌های تبادلگرهای گرمایی می‌گذرند.

جنگهای زیردریایی، برای ساخت مواد منفجره، در اندیشه شدند. لازم بود که اسید نیتریک تولیدی با ۴۵ تا ۵۰٪ اسید را برای اینکه به ۸۵٪ و بیشتر برسد، تغلیظ کرد. این کار با مخلوط کردن اسید رقیق با اسید سولفوریک انجام می‌گیرد، که آب خود را به‌هنگام تقطیر حفظ می‌کند. این یک روش کلاسیکی است که مؤسسات متعددی برای آن راه‌حلهای گوناگون یافتند و بعضی از آنها غلظت را به ۹۹٫۵٪ رسانیدند.

آمونیاک که در اواسط نخستین جنگ نسبتاً فراوان شده بود به فراوردهٔ اصلی ساخت اسید نیتریک ضرور جهت تولید مواد منفجره تبدیل شد. در چنین اوضاع و احوالی است که اصلاحات در روش اوستوالد و پژوهش برای یافتن روشهای گوناگون بشدت رواج یافت. آلمانیها بیشترین سهم را در این فعالیت دارند و در امریکا آقای چارلز ل. پارسنز بعد از سال ۱۹۱۶ اقدام کرد.

در آلمان روش اصیل بوسیلهٔ BASF و در کارخانهٔ اوپائو[1] انجام می‌گرفت. در این کارخانه سنتز آمونیاک با روش فریتس هابر از سال ۱۹۱۴ عمل می‌شد (شکل ۶۵). مهندسان بادیش آنیلین اوند زودا فابریک به مدیریت آقای الوین میتاش[2]، حدود سال ۱۹۱۵ توانستند به‌جای پلاتین از اکسیدآهن همراه با اکسیدهای دیگر فلزی به‌عنوان کاتالیزور استفاده کنند. گروههای پژوهشی این

1. Oppau 2. Alwin Mittasch

مؤسسه تجربهٔ بسیاری در این کار از روبراه کردن ساخت اسیدسولفوریک مجاورتی به‌دست آوردند و برای یکبار دیگر برتری خود را بر همهٔ گروههای دیگر فیزیکوشیمیدانهای صنعتی سراسر جهان ثابت کردند. تجهیزات کامل تنها در سال ۱۹۱۸ به‌طور قطعی به مرحلهٔ تولید رسید. اصول طرزکار این دستگاه و نیز ساختار آن بسیار متفاوت از کنورتیسور اوستوالد بود. هر واحد می‌توانست ۱۲۰ تن آمونیاک در هر روز تولید کند.

در فرانسه دورنمای ساخت اسید نیتریک با اکسایش آمونیاک، با گذشت مدت زیادی از آغاز جنگ مطرح شد. بررسیهای این کار به‌عهده آقایان پل پاسکال و دوکاریر[1] شیمیدان گذاشته شد. این بررسیها به اطلاع همه جانبه‌ای از واکنشها و شرایط لازم برای اینکه سوخت آمونیاک در مقیاس صنعتی انجام گیرد انجامید. اما راه‌حل عملی نوینی یافت نشد، بنابراین کار خود را متوجه تأسیس کارخانه‌ای در آنگولم کردند که نسخه بدل کارخانهٔ ویلوورد[2] بلژیک با همان ظرفیت تولیدی کم بود. پس از اینکه مرحلهٔ بحرانی جنگهای زیردریایی به پایان رسید گویا فرانسه روی آیندهٔ خوش مخازن نیترات شیلی حساب می‌کرد و به کارخانهٔ آنگولم به‌چشم یک مسکّن می‌نگریست. انتظار سود اقتصادی از این روش نداشتند.

افزایش تولید کارخانه‌های موجود برای سال ۱۹۱۸ از همان پایان جنگ، قطع شد. زمانی‌که کارشناسان متفقین، کارخانه‌های آلمان را بازرسی کردند از اهمیت تجهیزات و ظرفیت تولیدی آنها شگفت‌زده شدند. آقای لویی هاکسپیل[3] در ۱۹۲۲ در شرح کارخانه‌های BASF می‌نویسد: «کارخانه اُپائو بدین‌ترتیب می‌تواند تقریباً همهٔ آمونیاک تولیدی خود را به اسید نیتریک تبدیل کند، کاری که تنها با آغاز جنگ جدیدی لازم است به آن دست یازد.»

در واقع در طی دههٔ پیش از جنگ جهانی دوم است که روشهای سنتی به کناری گذاشته شدند و این صنعت آغاز به ساخت تقریباً انحصاری اسید نیتریک با روش اکسایش آمونیاک پرداخت و علت آن علاوه‌بر پایان پذیرفتن تدریجی رگه‌های نیترات طبیعی، به‌کار افتادن واحدهای تولیدی آمونیاک سنتزی بود.

آمونیاک سنتزی فراورده‌ای بود که از ناخالصیهای ارسنیکی و گوگردی فارغ بود ـ ناخالصیهایی که کاتالیزورگرها را، در زمانی‌که جز آمونیاک تهیه شده با روشهای شیمیایی در دسترس نبود، «مسموم» می‌کردند. اما عوامل دیگری نیز به سود این روش تولید بودند. طی سالهای ۱۹۲۵ ـ ۱۹۳۰ متالورژی توانست فولادهای مقاوم در برابر بخارهای نیترو بسازد. در این زمان توانستند واحدهایی برای تبدیل و جذب بسازند که تحت فشارهای چندین اتمسفر کار می‌کردند. این واحدها، نخست در ممالک

1. Decarriére   2. Vilvorde   3. L.Hackspill

متحدهٔ امریکا (دوپون دونمور)، سپس در ایتالیا تأسیس شدند. آنها اسیدهایی با غلظتهای ۶۰ تا ۷۰٪ تولید کردند.

بعدها، تولید آمونیاک سنتزی از تولید اسید نیتریک جدا شد. در واقع تحویل آمونیاک مایع به مشتریان برای اینکه آن را به اسید تبدیل کنند بیشتر به‌صرفه نزدیک بود تا اینکه آن را به‌کار برند. این پراتیک، راکد گذاشتن سرمایه‌های بزرگ به شکل ظرفهای ساخته شده از فولاد رنگ‌نزن را بی‌مورد می‌کرد و از فولادهای معمولی برای حمل آمونیاک استفاده شد.

سنتز صنعتی آمونیاک

دیده شد که بررسی ترکیب نیتروژن با هیدروژن در تمام سالهای نخستین سده بیستم، در زمرهٔ کارهای اولیهٔ بزرگ فیزیکوشیمی بود و به طرح یک روش بدیع ساخت صنعتی انجامید. این کارها در یک رشته پژوهشهایی از همین نوع، که راه را برای روشهای نوین تولید آمونیاک و اسید نیتریک (همان‌طورکه شرح داده شد)، هموار کردند، مؤثر بودند. اما سنتز آمونیاک، تا چند سال بعد وارد مرحلهٔ صنعتی نشد. تنها مشکل تحریک واکنشها در فاز گازی مطرح نبود، بلکه ترکیب کردن دو گاز: نیتروژن و هیدروژن، در فشار بالا، با دوباره به گردش در آوردن این مخلوط گازی در سراسر کاتالیزور، در فضای واکنش و با حذف بخشی که در هر گردش ترکیب می‌شد، نیز در میان بود.

دشواری در کار و وسایل: در پایه‌گذاری این روش، با دشواریهای کاملاً جدیدی از لحاظ کار و وسایل برخورد کردند: نخستین تجهیزات صنعتی ویژهٔ این روش در ۱۹۱۳ شروع، و در سالهای بعد در کارخانهٔ اُپائو متعلق به BASF تکمیل شد، محققاً نخستین نمونهٔ یک صنعت مهندسی نوین شیمی است.

مجادلات میان آقایان والترنرنست و فریتس هابر در سالهای ۱۹۰۳ تا ۱۹۰۵ به سود هابر تمام شد و شخص اخیر شرایط نظری این روش را که توانست با پشتیبانی مالی BASF عملی کند و آن را در ۱۹۰۸ به ثبت برساند، تعیین کرد. پایهٔ این روش به گردش درآوردن مخلوط نیتروژن و هیدروژن با درصد مناسب و نگاهداری آنها در زیر فشار ۲۰۰ اتمسفر در محفظهٔ استوانه‌ای واکنش، محتوی کاتالیزوری از آهن بود که بشیوهٔ خاصی آن را آماده کرده بودند. بهینهٔ دمای واکنش در چنین فشاری باید بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه باشد. جریان گاز تحت فشار باید سریعاً به‌سوی بخشی از تأسیسات با دمای کم هدایت شود و در آنجا، آمونیاک به شکل محلول آبی جدا می‌شود. چون بازده این واکنش کاتالیزوری از ۴ تا ۵٪ بیشتر نیست برای اینکه اتلاف جرم گاز ترکیب ناشده

زیاد نباشد باید آن را به‌طور پیوسته از محفظهٔ واکنش عبور داد و در هر عبورکمبود مربوط به حذف شدن آمونیاک تشکیل یافته را جبران کرد. بدین‌ترتیب، باید تجهیزات بسیار حجیمی طرح می‌شد که دارای تبادلگرهای طویل حرارتی، گازهای گرم و گازهای سرد دارای گردش مخالف یکدیگر در لوله‌های هم مرکز باشند. این شرایط ظاهراً نسبتاً ساده هستند اما تحقق آنها با دشواریهای فراوان برخورد دارد: تهیهٔ نیتروژن و هیدروژن خالص با بهای اقتصادی، حمایت از فلزاتی که در اثر هیدروژن دارای دمای بیش از ۴۰۰ متخلخل شده‌اند، به گردش در آوردن گازها با سرعت ثابت، آب‌بندی کردن اتصالات، بازیابی فراورده‌های جانبی و مقدار انرژی از بین رفته در بعضی از مراحل تولیدی.

طرح این مدار تولیدی و ساخت وسایل در اندازهٔ بزرگ برای کارخانه اُپائو، که بوسیله BASF در نزدیکی لودویگهافن انجام گرفت، از سال ۱۹۱۲ زیر نظر کارل بوش[1] بود. آقای بوش با تغییر نقطه نظر سنتی صنعتگران، از شیمی کلاسیک تمرکز عمودی عملیات گوناگون، از مرحلهٔ به‌کارگیری مواد خام تا به‌دست آمدن فراورده‌های تمام شده، با پرهیز از اتلاف فراورده‌های جانبی و هزینهٔ انرژی، حلقهٔ نخستین زنجیرهٔ کار خود را، ساخت کورهٔ کک‌سوز معیّن کرد. زغال تنها مادهٔ وارد به کارخانه، بود نیتروژن از هوا گرفته می‌شد و هیدروژن از آب رودخانهٔ راین.

چرخهٔ آلمانی تولید: این کوره‌ها ککی تولید می‌کردند که برای تهیهٔ این مخلوط گازی و گازهای سوختی مناسب بود. گازهای سوختی در موتورهای گازی به‌کار می‌رفتند که به‌طور قطعی جانشین ماشینهای بخار برای کار کمپرسورها و تلمبه‌ها شدند.

گازسازهای ککی، مخلوطی از گاز آب: اکسید کربن و هیدروژن، و گاز ضعیف یا گاز هوا، اکسید کربن و نیتروژن تهیه می‌کردند. وانگهی این مخلوط، درصد کمی هم گاز کربنیک داشت. این مخلوط تصفیه می‌شد و با گذرانیدن بخارآب در مجاورت کاتالیزوری که CO را به CO_2 تبدیل می‌کرد، آن را مناسب می‌ساختند. بعد، پس از تحت فشار قراردادن اولیه تا ۲۵ اتمسفر، انحلال گاز کربنیک در آب در یک ستون جذب انجام می‌گرفت.

در همین مرحله، دو کار همزمان، بازیابی فراورده‌های جنبی و انرژی را میسر می‌ساخت. جریان قوی آب که از ستون جذب خارج می‌شد توربین پلتون را می‌گردانید. این توربین حدود ۶۰٪ انرژی را که برای تغذیهٔ برج جذب مصرف شده بود، از نو به‌کار می‌گرفت. مرحلهٔ رفع فشار، گاز کربنیک را آزاد می‌کرد و این گاز کربنیک به واحد تولید کربنات دوسود هدایت می‌شد.

مخلوط نیتروژن ـ هیدروژن را بعداً مرحله به مرحله تا ۲۰۰ اتمسفر، تحت فشار قرار می‌دادند. سپس آن را با یک روش شیمیایی، کاملاً خالص می‌کردند. با این روش مقدار CO که به CO_2

1. C.Bosch

تبدیل نشده بود حذف می‌شد. در سالهای پایانی جنگ، مقدار CO به‌دست آمده برای تولید اکسی‌کلروکربن $COCl_2$ به‌کار گرفته شد. محصول اخیر، همان فسژن گاز جنگی بسیار کشنده است.

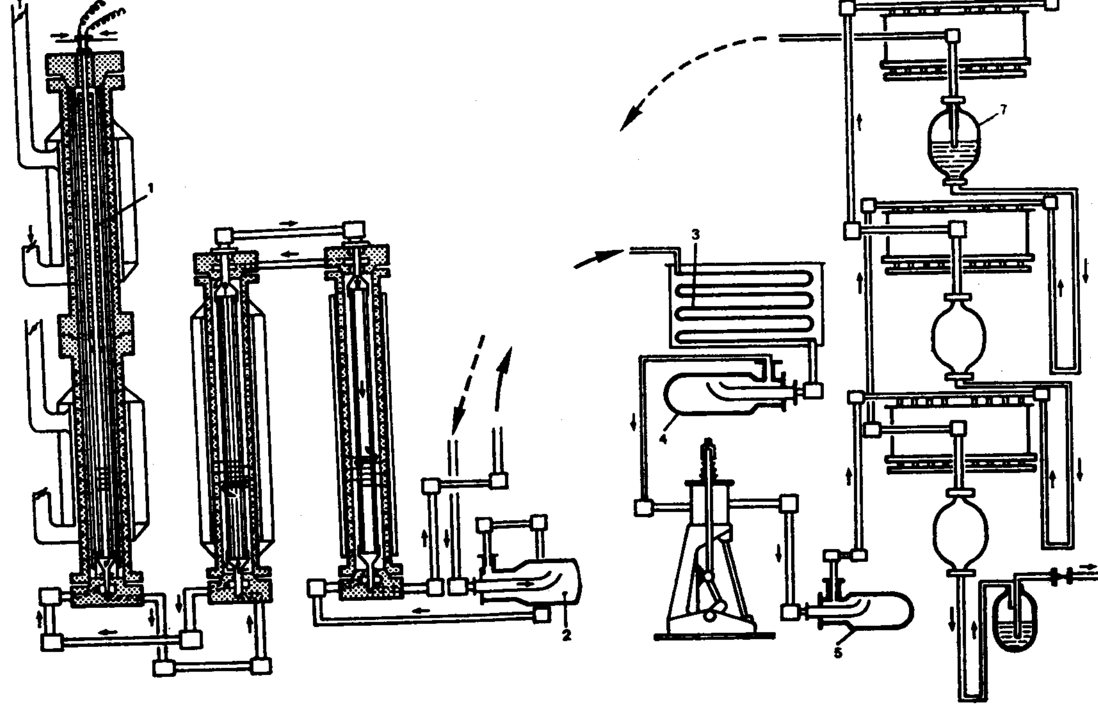
این گازها را سرانجام وارد مدار سنتز می‌کردند. در این مدار متحمل سه تبادلگر گرمایی و فضای واکنش، که مجهز به کاتالیزور بود می‌شدند (شکل ۶۶). جدار بیرونی این اتاق سوراخهایی داشت تا گردش یک پوشش نیتروژنی، که فلز را از آسیب هیدروژن حفظ می‌کند، ممکن باشد. این گازها با طی مسیری برخلاف مدار تبادلگرها، وارد دستگاههای میعان‌کنندهٔ می‌شوند تا آمونیاک تشکیل شده جذب شود.

بخشهای اخیر مدار، هنوز برای تولید دردسرهای فراوان دارند. این گازها در فشاری چنین بالا، ویسکوزیته‌ای دارند که مانع جریان آنها در مارپیچهای تنگ و طویلی می‌شوند که باید برخلاف جهت هوا از آنها بگذرند. آقای بوش و همکارانش این مسأله را با روی هم گذاشتن سه واحد میعان، که هرکدام با یک بطری جداسازی گازها از آب مجهز بودند. حل کردند. هرکدام از این واحدها به‌طور جداگانه، در جهت مدار خاص خود وارد طبقهٔ بعدی می‌شد. از بالای طبقهٔ آخر، مخلوط نیتروژن ـ هیدروژن ترکیب ناشده به مدار کاتالیز بازگردانیده می‌شد.

زمانی‌که کارخانه اُپائو تولید آمونیاک خود را در سال ۱۹۱۳ آغازکرده بود مجموعهٔ تجهیزات و وسایل، هنوز به این درجه ازکمال نرسیده بودند. تنها در سالهای بعد، طبعاً با مخفی کاری بسیار، این مجموعه کمال یافت. زمانی‌که شیمیدانهای کشورهای متفق، پس از متارکهٔ سال ۱۹۱۸، این کارخانه را دیدند در برابر برتریهایی مهندسان آلمان غرق حیرت شدند. چنین احساسی بعدها به همهٔ کارشناسان جهان دست داد. می‌توان چنین اندیشید که این کار حیرت‌انگیزBASF نقشی تاریخی در تغییر مسیر تکنیکهای شیمی صنعتی داشته است.

تولیدهای کوچک در خارج: در خارج آلمان دانشمندان فیزیکوشیمی در این دوران بسیار معدود بودند و ازسوی‌دیگر، مدیران صنایع به‌اندازهٔ آلمانیها از آنان پشتیبانی نمی‌کردند. آنان در شروع جنگ اطلاعات چندانی از روش هابر، جز یک گزارش که وی در ۱۹۱۰ تنظیم کرده و در ۱۹۱۳ انتشار داده بود، نداشتند. همچنین، شیمیدانانی که به‌هنگام جنگ در فرانسه، ایتالیا، سویس، انگلستان و ممالک متحدهٔ امریکا این مسأله را مورد بررسی قرار داده بودند، با اینکه یکی از نخستین همکاران هابر در زمان بررسیهای نظری وی، آقای لو روسیگنول[1] انگلیسی بود، به هیچ‌گونه نتیجهٔ مشخصی نرسیدند. کار پیشرفته‌ای که از روش BASF بسیار متفاوت بود مربوط به جنرال کمیکال کمپانی ممالک متحدهٔ امریکا می‌شد که در ماه ژوئن ۱۹۱۸ در شفیلد (آلاباما) کارخانه‌ای برپا داشت که

1. Le Rossignol



شکل ۶۶. تأسیسات BASF برای سنتز آمونیاک.

گردش گازها در مدار بسته. سمت چپ، محوطهٔ کاتالیز ۱، که بر روی یک وسیلهٔ اشتعالی قرار دارد تا واکنش آغاز شود. گازها با گذشتن از بطری جداسازی آب ۲ و سه تبادلگر حرارتی، به باتریهای جذب (سمت راست شکل)، می‌رسند. آنها پس از واکنش، در سراسر تبادلگرها پخش می‌شوند، از خنک‌کننده ۳، جداکنندهٔ آب ۴، تلمبهٔ گردش‌دهنده، جداکنندهٔ آب از روغن ۵، می‌گذرند، و وارد باتری جذب (در سمت راست نمایهٔ آن آمده است) می‌شوند. در هر طبقه از گردش گازها از پایین به بالا، آب از ۶ از بالا به پایین وارد می‌شود. در بالای هر طبقه، آب گازها را به درون مارپیچی وارد می‌کند و در یک بطری جداسازی ۷، جریان می‌یابد. گازها حرکت رو به بالا و آب آمونیاک حرکت رو به پایین را شروع می‌کنند.

در ماه نوامبر در هر روز بیش از هفت تن آمونیاک محصول نداشت، درحالی‌که در همان زمان هر دو کارخانهٔ BASF در سال صد هزار تن تولید داشتند. کارخانه شفیلد در ژانویهٔ ۱۹۱۹ تعطیل شد.

سنتز در فشار بالا: اما کوششی، در ابتدا منفرد، از آقای ژرژ کلود در فرانسه، آینده‌ای بسیار درخشان داشت، و از روش هابر هم ساده‌تر بود. در سالهای ۱۹۱۷ ـ ۱۹۱۸ زمانی‌که شیمیدانهای رسمی فرانسه، بیرون از مدارهای صنعتی با بی‌تفاوتی کار می‌کردند، با تحمل مرارت کوشیدند تا کارخانه‌ای آزمایشی در یکی از دانشگاههای پاریس بسازند. آقای ژرژ کلود با منابع شرکت Air liquide خود در کارخانهٔ خود Grande Paroisse واقع در مونترو[1]، نخستین وسایل سنتز کاتالیزوری آمونیاک با فشار ۱۰۰۰ اتمسفر را ساخت.

آقای کلود با کارکردن در چنین فشار بالا و درکوشش برای حفظ دمای واکنش در مرزهای مناسب، اندیشید که می‌تواند بازدهی ده برابر هابر به‌دست آورد. اما امکانات ساخت وسایل صنعتی قادر به تحمل فشارهایی تا این حد، در محافل فیزیکدانان با بدبینی زیاد مواجه بود. نخستین کوششها در اواخر سال ۱۹۱۷ در بولونی به‌عمل آمد و نشان داد که دشواریهایی فنی را می‌توان آسان برطرف ساخت. حجم گاز مورد عمل از روش هابر، پنج بار کمتر بود، زیرا در فشارهای بالا، مجموعهٔ وسایل حجم بسیار کمتری دارند و دشواریهای مربوط به مقاومت و آب‌بندی وسایل، علی‌رغم ظاهر کار، آسان برطرف شدند. همچنین حمایت از خوردگی فلز بوسیلهٔ هیدروژن، باکاربرد فولادهای ویژه، علی‌رغم بهای بالای آنها ـ به علت کمی مصرف ـ امکان داشت.

تلاش در مونترو ادامه یافت، زیرا در این کارخانه که برای پاسخگویی به نیازهای جنگی تجهیز شده بود، کلر را با الکترولیز کلرورسدیم می‌ساختند. بنابراین آقای کلود منبعی از هیدروژن خالص در اختیار داشت و پس از مدت زیاد به رفع مشکل تهیهٔ آن، جهت کاربرد، در سنتز آمونیاک با روش شخصی خود، موفق شد.

برتریهای دیگر روش کلود در اندک مدتی نمایان گردید. می‌توانستند از گردش پیوستهٔ مخلوط نیتروژن ـ هیدروژن، به علت بازده بالای واکنش، درگذر از روی کاتالیزورگر، صرفنظر کنند. گازهای ترکیب ناشده به واحد دوم و سپس سوم کاتالیز فرستاده می‌شدند و گردش آنها بدون یاری کمپرسور بود، و تنها، دتانتی که محدود به انتقال از یک واحد به دیگری بود برای این کار کفایت می‌کرد.

چون مقدار انرژی لازم برای ایجاد یک فشار اولیه ۱۰۰۰ اتمسفر، خیلی زیادتر از انرژی لازم برای ۲۰۰ اتمسفر نیست ترازنامهٔ انرژی عملیات در پایان کار بهتر است. سرانجام، کار در فشارهای بسیار بالا سبب خواهد شد که آمونیاک مایع خالص و بدون آب به‌دست آید.

1: Montereau

یک شرکت صنعتی جدید در سال ۱۹۱۹ با شرکت سن‌گوبن و آرلیکید تشکیل شد تا آزمایشهای با حجم متوسطی در تأسیسات صنعتی انجام دهد. مرحلهٔ اخیر سه‌سال بعد در کارخانهٔ مونترو عملی شد. مشکلات فنی جدید نیز برطرف شدند: افزایش حجم فضای کاتالیز از ۱۵۰ به ۱۴۰۰۰ سانتیمتر مکعب؛ خنک کردن وسایل با گردش سرب مذاب؛ حمایت در برابر خطرات انفجاری با ستبر و پرکردن دیوارهای بتونی.

فلسفهٔ کلی این روش نیز با روش آلمانی متفاوت بود. آقای کلود به‌جای سانترال‌های حجیم و کاملاً جدا، روش واحدهای نسبتاً سبک را در پیش گرفت، که می‌توانست آنها را در تأسیسات متالورژیکی، که در سایهٔ گازهای کک‌پزی، دارای هم ذخایر فراوان توان حرکت دهندگی و هم منبع هیدروژن هستند، به‌طور کامل جای دهد. کلود طبعاً روش تهیهٔ هیدروژن را با روشی که ویژگی آن، مایع کردن گازهای کوره‌های پخت کک، سپس تقطیر جزء‌به‌جزء آنها بود پایه‌گذاری کرد.

وی بدین‌ترتیب صنعت آمونیاک سنتزی را به مقتضای شرایط محلی می‌نگریست که منابع صنعتی و تولید سولفات آمونیم در کنار مناطق کاربرد آنها برای کشاورزی باید باشند. دلواپسی تهیهٔ نیترات طبیعی که به‌طور قطعی فراموش شده بود؛ در فرانسه باز تنها به تثبیت نیتروژن هوا فکر می‌کردند که می‌توانست پس از مدت کوتاهی، بتنها منبع مادهٔ اولیه برای ساخت اسید نیتریک تبدیل شود.

یک مقطع تاریخی: در برابر این دید کلی تفنن‌گرایی صنعتگران فرانسه و تقریباً همهٔ کشورهای دیگر، نسبت به تکنیکهای شیمیایی تازهٔ ناشی از تلاشهای زمان جنگ، رفتار صاحبان صنایع آلمان، بسیار واقع‌گرایانه‌تر بود و نشانی از توجه به‌کاری بود که شده است و چشم‌اندازی که باید مورد استفاده قرارگیرد. دوازده روز پس از متارکهٔ جنگ، در زمانی دارای ابهام سیاسی بسیار، در آلمان مؤسسات بزرگ شیمی و خود دولت، مشترکاً مؤسسه Stickstoff Gesellschaft را تشکیل دادند که نمایندگی فروش سراسری ترکیبات نیتروژنی ویژهٔ کشاورزی را برعهده داشت. در ماههای پایانی جنگ، تولید اسید نیتریک در آلمان بیش از نیازهای جنگی و کشاورزی آن بود. مؤسسه BASF کمی پس از پایان مخاصمات، پیشنهاد کرد که تولید سالانهٔ آمونیاک سنتزی خود را سه برابر کند. آقای لویی هاکسپیل، شیمیدان فرانسه در ۱۹۲۲ حساب کرد که مقدار سولفات آمونیمی که طی سه سال طبق معاهدهٔ ورسای به فرانسه، که از کمبود مداوم کود نیتروژنی رنج می‌برد داده شده است، تنها تولید یک هفتهٔ بادیش آنیلین اوند زودا فابریک را تشکیل می‌دهد.

این تهور در طرحها، ساختها و هدفهای صنایع شیمیایی آلمان در برههٔ ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۰، در

روند تاریخی سبب شد که تکنیکهای تولید در مرحله‌ای از تحول به مسیری وارد شود که در آغاز سده، تصور آن هم ممکن نبود. این مقطع تاریخی، نتیجهٔ اوضاع و احوالی است که در جریان جنگ جهانی دوم و در سالهای پس از آن وجود داشته است. اما با پایان جنگ که برای آلمان بسیار فاجعه‌آمیز بود،این صنایع شیمی ممالک متحده امریکا هستند که نقش پیشگامی قطعی را بر دوش دارند.

تحول و گوناگونی روشها

روشهای اصیل تثبیت نیتروژن بزودی به گوناگونی کشیده شدند. تاریخ میل دارد تنها به روشهایی بپردازد که به نخستین کاربرد صنعتی راه یافته‌اند و آنها را به مشهورترین کسانی‌که که در این راه کوشیده‌اند، نسبت دهد. اما، در واقع صنعتگران متعدد، شرکتها یا افرادی، انواعی از روشهای نخستین را اصلاح می‌کنند و حتی روشهای گوناگونی را با هم تلفیق می‌کنند و از هر روش، بخشی را که به‌نظر بهتر و ساخت آن آسانتر و بازده آن بیشتر و هزینهٔ تولیدی کمتری دارد برمی‌گزینند.

عوامل تحول: در مورد مصالح، وسایل و طرز کار، چه برای تبدیل سیانامید به آمونیاک، و چه برای سنتز آمونیاک و بالاخره جهت اکسایش آمونیاک و سرانجام جذب بخارهای نیترو و میعان اسید نیتریک به‌دست آمده، همان حالات بالا وجود داشته است. چیزی که در این تحول می‌توان گفت، سرعت چشمگیر آن است. گرچه صنعت سنتی نیتروژن مدتها پابرجا ماند، بی‌شبهه این صنعت جدید، تکنسین‌های متعددی را شیفتهٔ خود کرده بود. اگر به گذشته نگاه کنیم می‌توان گفت که عدم اعتماد و نااستواری نسبی منابع طبیعی، همچون محرکهایی بنفع تثبیت مستقیم عمل کرده‌اند. آقای پل پاسکال، شیمیدان فرانسوی در سال ۱۹۳۰ دربارهٔ ۶۰۰ تا ۸۰۰ میلیون دهان باز پرسش می‌کند «که می‌توانند این تغذیهٔ ویژه را یکی از دلایل برتریهای اخلاقی و سیاسی به‌شمار آورند»، زیرا شمار مصرف‌کنندگان با سرعتی بیش از پهنه‌های کشت شده افزایش می‌یابد و نیز همهٔ زمینهای مستعد کشت غلات، بزودی زیر کشت خواهند رفت و بنابراین بهبود خاک با ترکیبات نیتروژنی ناگزیر خواهد شد.

تردیدی نیست که چنین تأملاتی در سالهای ۱۹۳۰ وجود داشته است. در همان زمان کارشناسان دیگری این دلواپسی را داشتند که اگر مصرف فراورده‌های نفتی از نظر تناژ تغییر نکند، به گمان این کارشناسان، ذخایر جهانی نفت طی سی‌سال پایان می‌پذیرد. دغدغهٔ این کمبود، آشکارا یک واکنش طبیعی انسان در برابر افراط‌گرایی است. جای تردید است که مخترعان دههٔ نخست

سده، خواسته‌اند به بشریتی که در برابر کمبود احتمالی فراورده‌های نیتروژن طبیعی قرار دارد، داروی آرام‌بخشی ارائه کرده باشند.

تردیدی نیست که این کسان را روح مقابله با مشکلات به میدان آورده است و رضامندی از ساختن یک کار شخصی، بیشتر آنها را تشویق می‌کرد تا احتمال سود اقتصادی. مطالب بالا بقدر کافی کوششهایی را که برای تطبیق روشها و بویژه برای دگرگون ساختن امتیازها انجام گرفته است، توضیح می‌دهد. این نوع رفتار، پدیدهٔ تازه‌ای هم نیست، اما از این دید، اهمیت دارد که بسیار سریع به زمینه‌ای روی آورد که کشف آن بسیار تازه بود و بنابراین دورنماهای سودآوری آن، اگر نیازهای جنگی با چنان ابهتی پیش نمی‌آمدند، اطمینان‌بخش نبودند.

دربارهٔ این گوناگونی که بسیار سریع در روشهای اصیل پدید آمدند، تنها به نشان دادن چند نمونه بسنده می‌کنیم.

دربارهٔ آمونیاک سنتزی، در سالهای جنگ، تأسیس کارخانه اُپائو، سپس مرزبورگ[1] طبعاً دستخوش اصلاحات پیاپی بوده‌اند. تهیهٔ مخلوط گازی و خالص کردن آن، ترتیب واحدهای کاتالیز، وسایل جذب، راه‌حلهای گوناگونی را مطرح ساختند. اما این اصلاحات به‌هیچ‌وجه اقتصاد کلی روش هابر را آشفته نکرد.

سنتز آمونیاک در فشارهای متفاوت: پس از جنگ جهانی اول، روشهای دیگر سنتز آمونیاک در حدود سال ۱۹۲۰ پدید آمدند. روش ژرژ کلود که قبلاً توضیح داده شد، افکار را هیجان‌زده کرد، زیرا برپایهٔ راه‌حلهای بسیار زیبایی قرار داشت. خود اصطلاح فرافشار hyperpression، که وی به‌کارگرفته بود نشانی از این زیبایی است. روش وی صنعتگران دیگری را برانگیخت تا از فشارهای بسیار بالاتر از فشاری که آقای هابر به‌کار برده استفاده کنند، و بااین‌همه فشار مورد استفادهٔ آنها از فشار کلود کمتر بود. آقای کساله[2] صنعتگر ایتالیایی، روشی را در سال ۱۹۱۸ به ثبت رسانید که در آن، هیدروژن در اثر گرمای برق، در فشار ۶۰۰ تا ۸۰۰ اتمسفر در هوا می‌سوخت. کاربرد این روش در ۱۹۲۲ آغاز شد و چند سال پس از آن، در فرانسه تأسیساتی از این نوع با ظرفیت بسیار بیشتر از ظرفیت کارخانه‌های نوع کلود، برپا شدند.

روشهای دیگری، ازجمله، روشهای: فوسر[3] در ایتالیا و Nitrogen Engineering Co در ممالک متحدهٔ امریکا بروش BASF نزدیک بودند و از فشاری حدود ۲۵۰ اتمسفر استفاده می‌کردند.

سرانجام، در سالهای بعد گرایش مخالفی پیدایش یافت. کوششی، غالباً موفق، به‌عمل آمد تا با فشارهای نسبتاً پایینتر، بین ۸۰ تا ۱۹۰ و حتی ۱۰ تا ۱۳ اتمسفر کار شود. با تغییر دادن

1. Merseburg 2. Casale 3. Fauser

نوع این تأسیسات و بویژه تغییر کاتالیزورها نتایج بسیار متفاوتی به‌دست آمد. واکنش ترکیب نیتروژن ـ هیدروژن، در اصول تغییری نکرده بود و سرانجام این واکنش به‌طور صنعتی عملی می‌شد، چه در فشارهای متوسط حدود ۲۵۰ اتمسفر، چه در فشارهای بالای ۸۰۰ تا ۹۰۰ اتمسفر.

یک تحول پرهیجان: دیده شد که انواع روشهای تثبیت نیتروژن با اکسایش مستقیم، چگونه بوده‌اند. در جنب قوس بیرکلند و اید که به توسط یک میدان مغناطیسی دمیده می‌شد، انواع دیگری از کوره‌ها با سرنوشتهای متفاوت به‌کار گرفته شدند: کوره‌های قوسی گردان که توسط میدان مغناطیسی موسیتسیتسکی[1] یا زیبرت[2] دمیده می‌شوند و در سویس کار گذاشته شدند؛ کوره‌های قوسی دمیده شونده با هوای تحت فشار، ساخت شونهر یا پاولینگ که در کشورهای آلمان، ایتالیا، فرانسه و نروژ ساخته شدند. اما همینکه جنگ به پایان رسید مؤسسات مختلف که غالباً با سرمایه‌های بین‌المللی تغذیه می‌شدند به رشته‌های دیگر الکتروشیمی روی آوردند.

گوناگونی این تأسیسات را می‌توان از جنبهٔ تجهیزات جذب گازهای نیترو و میعان اسید هم بررسی کرد. این مشکل برحسب اینکه فراورده‌های اکسایش مستقیم نیتروژن یا اکسایش آمونیاک باید عمل آورده شوند تغییر می‌کند. راه اخیر که پس از صنعتی شدن راه نخست کشف شد، در ابتدا از راه نخست راه‌حلهایی را اقتباس کرد تا برای رفع نیازهای خود، آنها را مناسب سازد. اما، در هر دو راه، فراورده‌های مشابهی که از کوره‌های اکسایش خارج می‌شدند مورد عمل قرار نمی‌گرفتند. بنابراین، لازم آمد که بخارهای نیترو تشکیل شده بوسیلهٔ اکسایش آمونیاک را برحسب خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها مورد عمل قرار داد. در اینجا ما وارد توصیف راه‌حلهای گوناگونی که مورد بررسی یا عمل قرار گرفتند، نخواهیم شد و تنها این واقعیت را خاطرنشان می‌کنیم که تکنیکهای نوین ساخت اسید نیتریک منحصر به شکلهای تغییرناپذیری نبودند، بلکه عکس آن حقیقت داشت.

گسستن از شیمی صنعتی کلاسیک سدهٔ نوزدهم در اینجا بروشنی دیده می‌شود. در واقع در مراحل اولیهٔ صنعت بزرگ شیمی‌آلی و ساخت رنگهای مصنوعی، همین جریان را دیدیم. اما می‌توان اندیشید که آنهایی که در آن زمان به پیدایش یک شاخهٔ جدید صنعتی کمک کردند طبعاً با ویژگیهای آن آمیختند. در مورد صنعت نیتروژن، همان‌طورکه درگذشته تأکید کردیم، باید گفت که با چرخشی مواجهیم که از روشهای کلاسیک شیمی معدن جدا شده است. و این ادعایی است که ارزش اثبات را دارد.

برای اینکه تصور باز هم کاملتری از راههای گوناگونی که طی سالهای ۱۹۱۰ ـ ۱۹۲۰ رواج داشتند به‌دست دهیم، اقدامات صنعتی کردن تثبیت نیتروژن را، به‌طور خلاصه، به‌توسط سیانورها

1. Moscicki 2. Siebert

یا نیترورها، بازگو می‌کنیم. به‌یاد می‌آوریم که پژوهشهایی که به کشف سیانامید انجامیدند، باید قبلاً سیانور را آشکار می‌ساختند. آقایان فرانک و کارو در سال ۱۸۹۳ سیانور را دقیقاً به‌دست آورده بودند.

این کار در واقع ادامهٔ کوششهای بسیار قدیمی بود که نخستین دستاورد آن در صنعت مربوط به آقایان پوسوز[1] و بوواسیر[2] در سال ۱۸۴۳ می‌شد، و تا حدود ۱۹۲۰ ادامه یافت. مدتهای زیاد امید داشتند که بتوانند نیتروژن را در حالت سیانیدی تثبیت کنند و برای این کار، جریان گاز را روی مخلوطی از زغال و کربنات بگذرانند. در این زمینه هم انواع روشها وجود داشته است.

همین‌طور، تثبیت نیتروژن روی فلزات، در شکل نیتریدها، که یک واقعیت شیمیایی است، هرگز شکل یک روش صنعتی رضایتبخش نداشته است. طولانیترین تلاشها بی‌شبهه به‌ساخت نیتروراَلومینیم ارتباط دارد که می‌توانست همزمان با استخراج الکترولیزی این فلز باشد. در فرانسه، کار اصلی یا تنها کار، حدود سال ۱۹۱۳ در سن‌ژان دومورین بود اما ردیف اختراعاتی که در این مورد به ثبت رسیدند گویا زیاد روشن نبودند. در همین خط، پژوهشهایی مربوط به تهیهٔ نیترورهای دیگر، سیلیسیم و تیتان، سرانجام به علت سود ناچیز صنعتی فراورده‌های به‌دست آمده، متوقف شد.

تبدیل صنعت نیتروژن در جریان ثلث نخست سدهٔ بیستم، با جدولهایی که آقای پل پاسکال در ۱۹۳۲ تنظیم کرده است بخوبی روشن می‌شود. همهٔ ارقام این جدولها، نیتروژن خالص موجود در ترکیبات صنعتی گوناگون را نشان می‌دهند. توزیع منابع گوناگون به شکل زیر تحول یافته‌اند:

	نیتروژن طبیعی	نیتروژن پخت کک	نیتروژن سنتز
۱۹۰۵	٪۶۷٫۷	٪۳۲٫۳	٪۰
۱۹۲۰	٪۴۳٫۹	٪۳۱٫۷	٪۲۴٫۴
۱۹۳۰	٪۱۹٫۱	٪۱۶	٪۶۴٫۹

همین بررسی آقای پل پاسکال، در صفحهٔ ۶۶۷ جلد III کتاب *Traité de chimie minérale* به شکل بسیار روشنی، تحول «پرهیجانی» را که صنعت نیتروژن طی این دهه‌ها بر خود دیده است نشان می‌دهد ـ تحولی که باید در سالهای پس از جنگ جهانی دوم، با کنار گذاشتن همهٔ روشها، جز روش سنتز غیرمستقیم اسید نیتریک، با تهیه و اکسایش کاتالیزوری آمونیاک، پایان یابد.

1. Possoz 2. Boissiére

۶

مواد مصنوعی در فراورده‌های سنتز

نخستین عصر پلاستیکها

فاصلهٔ زمانی میان دو جنگ جهانی را محافلی از دانشمندان و صنعتگران، عصر پلاستیک نام نهاده‌اند. آنان بدین‌ترتیب خواسته‌اند دوران شکوفایی یکی از صنایع شیمیایی را تعریف کنند که گروههایی از مواد مصنوعی روزافزون از نظر تعداد و خواص را روانهٔ بازار کرده است. شیمیدانها در دلبستگی به این مواد، تنها نبودند، کاربرد آنها بسرعت در همهٔ جهات زمینه‌هایی یافت و نوع تدارکات، روشهای کاراندازی و فراورده‌های تمام‌شدهٔ صنایع بسیاری را تغییر داد.

درواقع، کهنترین مادهٔ مصنوعی، سلولوئید، در سال ۱۸۶۵ شناخته شد. ساخت آن از سال ۱۸۷۰، همان‌طور که درگذشته دیدیم، بسرعت در ممالک متحدهٔ آمریکا رواج گرفت. در فرانسه نخستین کارخانهٔ تولید سلولوئید به توسط برادران شمربر[1] در شهر استن[2] گشایش یافت. برادران شمربر به‌حساب آقای ج. و. هایت مخترع، آنجا کار می‌کردند. بعدها کارخانه‌های دیگری در آلمان و انگلستان برپا شدند.

اما مشتقات سلولوز، پلاستیکی یا ناپلاستیکی، صرفاً فراوردهٔ نوعی تبدیل یک ماده طبیعی

1. Schmerber 2. Stains

هستند که به شکلهای گوناگون به فراوانی کاربرد دارد. مواد تولید شده، سلولوئید، فیلم و فیبر خواصی معین و کاربردی محدود دارند.

در پایان سدهٔ نوزدهم و آغاز سدهٔ بعدی در حدود دو دهه برای تغییر کامل چشم‌اندازهای تولیدکنندگان و نیز مصرف‌کنندگان کارهای گوناگونی انجام گرفته است.

این مرحلهٔ نخست تغییر شکل صنعت پلاستیکها با کاربرد و ترکیبات ساده‌تر از سلولوز، از قبیل فراورده‌های صنایع شیمیایی، فنول، اوره، فورمول (فورمالدهید) به‌عنوان مواد خام و و استفاده از واکنشهای تراکمی، سپس پدیده‌های بسپارش (پولیمریزاسیون) مشخص می‌شود. بنابراین خود شیمیدان، درشت‌مولکول را، که درگذشته از طبیعت می‌گرفت، برای ساختن جانشینهای مواد سنتی مورد استفاده در ساختمانهای متعدد، می‌سازد. این مواد جانشینی، غالباً مشخصاتی بهتر از مواد سنتی دارند.

کازئین جامد: آقایان اشپیتلر[1] و کریش[2] که در سالهای ۱۸۹۷ تا ۱۸۹۹ طرز تهیهٔ یک مادهٔ شاخی مصنوعی را با عمل آوردن کازئین بوسیلهٔ فورمول جست‌وجو می‌کردند طرز تهیهٔ کازئین جامد را روشن ساختند.

کازئین موجود در شیر خامه گرفته شده با روشهای مختلفی از مدتی پیش برای ساختن انواعی چسب یا لعاب به‌کار گرفته می‌شد. می‌توانستند آن را با افزودن مایهٔ پنیر، دیاستازی که در شیردان گوساله‌ها وجود دارد، یا به توسط تخمیر لاکتیکی طبیعی، یا با اسیدی کردن مصنوعی شیر بدون خامه با اسید استیک، کلریدریک یا سولفوریک به‌دست آورند. در آن زمان می‌دانستند که چگونه ازآن برای تهیه نوعی کف دریای مصنوعی، سیلیکات منیزی که بهای گزافی داشت استفاده کنند. برای این کار، کازئین را با اکسید منیزیم تکلیس شده و اکسید روی مخلوط می‌کردند. اما این اجسام پایدار نبودند و پس از مدتی خراب می‌شدند.

... به توسط فورمول: سخت کردن کازئین به توسط فورمول می‌تواند در مقیاس صنعتی انجام شود، زیرا آقای ا. تریلا[3] پس از چند سال بررسی، برای تهیهٔ این آلدئید مورد استفاده صنعت، روشی یافت. فراوردهٔ نخستین، الکل متیلیک بود که در آن زمان یک فراوردهٔ جنبی و فراوان تقطیر چوب بود. اکسایش آن با اکسیژن هوا در یک وسیلهٔ تقطیر که لوله‌آلات آن محتوی مس بودند آن را به آلدئید تبدیل می‌کرد. تولید صنعتی آن که معلوم شده بود می‌تواند عاملی برای سخت شدن کازئین باشد طی چند سال گسترش یافت و به فراورده‌ای نسبتاً فراوان و ارزان تبدیل شد. پس از روش آقای تریلا، روشهای دیگری پیش کشیده شدند. این روشها به‌طور کلی تنها از لحاظ کاتالیزور

1. Spitteler 2. Krische 3. Trillat

با روش تریلا تفاوت داشتند. بااین‌حال، کاربرد صنعتی فورمول به مقدار زیاد برای تهیهٔ رزینهای فنولی یا اوره‌ای، که بعدها با آنها برخورد خواهیم کرد، تنها زمانی عملی شد که سنتز مستقیم الکل متیلیک (متانول) در سال ۱۹۱۳ در BASF انجام گرفت و در ۱۹۲۲ بوسیلهٔ آقای پاتار[1] فرانسوی تکمیل شد. این روش مطابق یک روش کلی سنتز؛ برپایهٔ گاز آب عملی می‌شود. بعداً در موقعیتی بدان باز خواهیم گشت.

کازئین جامد با آغاز سدهٔ بیستم با نامهای گوناگون بازرگانی ساخته می‌شد که رایجترین آن در فرانسه، گالالیت *galalithe* نام داشت. کازئین مورد استفاده، بویژه کازئین خمیر مایه‌ای بود که تهیهٔ آن مراحل مختلفی داشت؛ از شست‌وشوی ابتدایی گرفته تا نمزنی و افزایش بارهایی به آن، شکل دادن و بالاخره پرس کردن آن بود. مادهٔ مورد عمل، که نخست برای صنعت کائوچو تولید می‌شد، سپس برای تهیهٔ سلولوئید، هرگاه برای این کار، اشکالی داشت، آن اشکال به‌آسانی برطرف می‌شد. شکل نهایی آن، صفحه‌ای، به شکل نی، لوله‌ای، دگمه‌ای و ... پیش از افزایش فورمول به آن داده می‌شد. فورمولدهی در واقع از راه واکنش تراکمی، انجماد را تحریک می‌کند. چگونگی این واکنش تراکمی هنوز شناخته شده نیست و برخلاف رزینهای مصنوعی دیگری که بعدها شناخته شدند، ادامه نمی‌یابد و به واکنش بسپارشی نمی‌انجامد. بدین‌ترتیب جسمی تهیه می‌شود که تنها در تهیه مهره‌های تخته و شطرنج می‌تواند به‌کار رود، اما در زیر این عنوان، تنها رزینهای کازئینی سریعاً رواج یافتند.

پشم کازئینی: بعدها، در ۱۹۳۵ آقای فرتی[2] ایتالیایی توانست کازئینی را که به‌شکل رسوب در اسید سولفوریک به‌دست آورده بود، پس از به اصطلاح رسیده شدن و انعقاد در یک محلول اسیدی، با ریسیدن به شکل پشم درآورد. این «پشم» کازئین در اروپا نخست با نام لانیتال *lanital* موفقیتی به‌دست آورد. تولید آن پس از جنگ جهانی دوم، در امریکا هم ادامه یافت. اما تنها منبع کازئین قابل استفاده، باز هم شیر بود، گرچه دَهها سال کوشش شد تا کازئین را از بعضی گیاهان، بویژه سویا استخراج کنند. پروتئیدهای دیگری نیز بررسی شدند که فراوانترین و اقتصادیترین منبع آنها کنجالهٔ روغن گرفته بادام‌زمینی بود. بدین‌ترتیب، در سالهای ۱۹۵۰ الیاف پروتئیدی به بازار آمد که در نساجی مخلوط با پشم به‌کار گرفته شدند. اما الیاف مصنوعی که بعدها شناخته شدند و بسرعت گسترش یافتند با الیاف کازئینی رقیب شدند.

تراکم فنول-فورمول: کمی پس از پیدایش رزینهای کازئینی جامد، آقای لئوهندریک باکلند[3] شیمیدان با تبار بلژیکی توانست با فراورده‌های تراکم فنول و فورمول یک رزین مصنوعی تازه با

1. Patart 2. Feretti 3. Baekeland

نام باکلیت را به‌دست آورد که موفقیت آن سریع بود. تا آن زمان، لعاب (ماگما)هایی که در بعضی از شرایط تشکیل می‌شدند مزاحم شیمیدانها بودند و سعی در برطرف کردن آنها می‌شد. بااین‌حال آقای بایر شیمیدان آلمانی در سال ۱۸۷۲ فراورده‌های تراکم فنول ـ فورمول را بررسی کرده بود، بدون اینکه انتظار کاربرد صنعتی از آن داشته باشد. نخستین اختراعی که دراین‌باره به ثبت رسید در آلمان در ۱۸۹۱ به‌نام کلایبرگ[1] بود. اختراعات دیگری از پی آمدند: اختراع لئونار لدرر[2] ۱۸۹۴، آرثر اسمیت ۱۸۹۹، لوفت[3] ۱۹۰۲. دو سال بعد آقای باکلند به این موضوع علاقه‌مند شد.

آقای باکلند چند سال بود در ممالک متحدهٔ امریکا ساکن شده بود و در یک کارخانه سازندهٔ کاغذهای عکاسی Velox برای تسریع در این کار تحقیق می‌کرد. وی که از آزمایشهای پیشین آگاه بود هشیارانه کوشید تا دشواریهای موجود را مرتفع سازد و در تحقیقات خود، سه محور اصلی را مورد توجه قرار داد: نوع کاتالیزور، اسیدی یا قلیایی (نسبت فنول به فورمول) در مخلوط واکنش، دمای کار. باکلند محیط قلیایی را برای تراکم و نیز دمای بالا را برگزید. نخستین نتایج قابل قبول را در سالهای ۱۹۰۸ ـ ۱۹۰۹ به‌دست آورد و شرکت خود را، به‌نام باکلیت در ۱۹۱۰ تأسیس کرد.

اختراع باکلند، صنعت مواد پلاستیکی مصنوعی را بکلی تغییر شکل داد. باکلیت نمونهٔ خانواده‌ای از رزینها بود ـ خانواده فنوپلاست، که تعداد آن با تغییر دادن این یا آن جزء سازنده بسرعت افزوده می‌شد و ده سال بعد بر همان اساس خانوادهٔ دیگری، آمینوپلاست را، به وجود آورد که گرچه به‌اندازهٔ فنوپلاست، پر ازدحام نبود، اهمیت اقتصادی آن با دیگری برابر بود. باکلیت، نمونهٔ رزینهایی بود که بعدها آن را گرماسخت[4] نامیدند، در برابر رزینهای گرمانرم[5] که ساخت آنها از سال ۱۹۳۰ با روشهای سنتزی آغاز شد.

باید گفت که تکنسین‌های شیمی عملاً با ساخت باکلیت و تعدادی فنوپلاست، نخستین تمرین خود را از امکانات متعددی که در برابر داشتند به عمل آوردند. در واقع با روشهای مختلف تهیه، نخستین ردیف مواد با خواص فیزیکی گوناگون را ساختند: نوولاک novolaque، که در حلالهای آلی سخت نمی‌شود؛ رزیت، résite که سخت می‌شود و محلول نیست؛ و رزول résol، که بینابین است.

وانگهی می‌توانستند با ترکیب آنها نیز بازی کنند و آلدئید فورمیک یکی را با آلدئید، بنزآلدئید، آکرولئین، فورفورال . . . و از سوی دیگر فنول را با بعضی از همرده‌های آن نظیر کرزول یا کسیلنول عوض کنند. همهٔ این اجسام یا از مواد طبیعی به‌دست می‌آیند یا از ترکیبات ساده‌تر، اما از ریشهٔ طبیعی.

1. Kleiberg 2. L. Lederer 3. Luft 4. Thermodurcissable 5. Thermoplastiques

تجارتی شدن فنوپلاستها: بدین‌ترتیب، فراورده‌های بالا به اشکال فیزیکی و با امکانات گرماسختی بسیار گوناگون ارائه می‌شوند: مواد ریخته‌گری به شکل مکعبها، صفحات، باتونها، روکشهای روی حاملی نظیر کاغذ، پارچه، چوب که منظره، رفتار و کارایی را تغییر می‌دهند، گردهای قالب‌گیری شامل مواد پرکننده، مواد شکل‌دهنده، تسریع‌کننده سخت‌شوندگی و رنگ‌دانه.

مصرف‌کنندگان فنوپلاست، نخستین شکوفه‌های اجسامی را در برابر خود یافتند که پاسخگوی نیازهای بسیار وسیعی بود که در آن زمان به برکت گوناگونی وسایل موجود: قالب‌گیری، برش، سوراخکاری و غیره ایجاد شده‌بودند؛ و نیز خواصی که پس از بسپارش نهایی: پایداری در برابر اعوجاج، سختی، خراب نشدن در اثر عوامل جوی و شیمیایی، حل‌ناشدن و خواص دی‌الکتریکی به‌دست می‌آمدند.

گرچه تولید رزینهای فنولی در سالهای ۱۹۱۰ آغاز شد، گسترش واقعی آنها در دو دهۀ بعد بود. به‌نظر نمی‌رسد که جنگ جهانی اول، در پیشرفت آن تأثیر زیادی داشته باشد. کاربرد آن در مقیاس زیاد، حتی در شروع تولید، مستلزم تکثیر یک مادۀ خاصی است که بدون شک تقاضاهای نظامی بسیار مبرم، جلوی آن را می‌گیرند. خواهیم دید که جنگ جهانی دوم تأثیر دقیقاً منفی روی صنعت مواد سنتزی داشته است.

پرورش تکنسین‌هایی نه‌تنها در رشتۀ ساخت، بلکه در امر کاربرد هم لازم بود. همۀ این مسائل در سالهای ۱۹۱۰ ـ ۱۹۲۰ هنوز به شکل بسیار تجربی حاصل می‌شدند.

اما با آغاز دهۀ ۱۹۲۰، گسترش رزینهای مصنوعی سرعت گرفت. فنوپلاستها در شما روزافزونی به بازار آمدند. در سال ۱۹۳۹ بیش از ۲۰۰ نام مواد فنوپلاستی در بازار دادوستد می‌شد که از آن میان، پس از باکلیت، نامهای: durite، formica، cegeite، fabrolite، gedelite، novolak، pertinax، progilite و ... بسیار شهرت داشتند.

زمانی‌که این فراورده‌های سنتزی ساخته شدند سرعت تحول در صنایع گوناگونی افزایش یافت. صنایعی که مواد مطلوب خود را در رزینها یافتند. در آغاز صنعت برق که باکلیت، یا همرده‌های آن، رفته‌رفته جانشین مواد عایق در ساخت تجهیزات کوچک و سپس قطعات مهمتر و طبعاً صنعت نوزاد پخش رادیویی شدند. این پدیده بعداً در صنعت اتومبیل‌سازی آغاز شد که در امریکای پیش از جنگ، وارد مرحلۀ راسیونالیزاسیون (عقلانی کردن، کفایت‌افزایی) روشهای ساخت شده بود و بیش از پیش وسایل قالبی را جذب می‌کرد. سرانجام صنایع فراورده‌های با مصرف زیاد، عروسک‌سازی، ساخت مهره‌های تخته و شطرنج، لوازم خانگی، جهانگردی و غیره، تا ساخت مبل و صندلی، پس

از اندک مدتی مشتریان فراوان یافتند.

اما فنوپلاستها، معایبی هم داشتند که مانع پخش آنها در بعضی از زمینه‌های کاربردی از قبیل تزیین، اشیاء شیشه‌ای یا قطعات فانتزی می‌شد. همهٔ آنها کدر و غالباً قهوه‌ای رنگ، اما همیشه تیره بودند. حتی زمانی‌که رزینهای فنولی را به شکل ورقه‌های شفاف به‌دست آوردند، باز بسرعت زردرنگ می‌شدند.

شیشه‌های سلولوزی: مشتقات نیتروژندار سلولوز، و نیز مشتقات استیلنی آن هم، پس از این‌که در اواخر سالهای ۲۰ دشواریهای ساخت آنها برطرف شدند تا مدتها برتریهای تردیدناپذیر خود را در بسیاری از کاربردها حفظ کردند. نه تنها آنها در قسمت ساخت فیلم به‌عنوان تکیه‌گاه امولسیون عکاسی یا به‌عنوان وسایل بسته‌بندی، ورنیها جانشین ندارند، بلکه امکاناتی برای نوآوریهایی هم ایجاد کردند.

سلولوئید در ساخت اتومبیل، با نام میکا برای داخل درب ورودی بعضی خودروها به‌کاربرد شده است. حدود ۱۹۱۹ ـ ۱۹۲۰ ساخت نوعی شیشه بیخطر آغاز شد. در فرانسه به این نوع شیشه، سه‌لایه‌ای *triplex* می‌گفتند که از دو ورقهٔ نازک شیشه ساخته می‌شدند که لایهٔ نازکی از نیتروسلولوز آنها را به‌هم چسبانید، بود. دراین‌باره معمولاً از حادثهٔ آزمایشگاه آقای بندیکتوس[1] شیمیدان فرانسوی صحبت می‌شود که در سال ۱۹۱۰ قدرت چسبانندگی نیتروسلولوز را روی شیشه با رهاکردن یک شیشه کلودیون ضخیم به نمایش گذارد. اما با یادآوری این نکته که مصرف‌کنندگان متعددی پیش از وی این مشاهده را داشته‌اند، باید دقیقتر فکر کنیم. در واقع این شیشهٔ دولایهٔ چسبیده، که در شکستن متلاشی نمی‌شود برای شیشه جلو راننده بسیار مناسب است. بااین‌حال، رواج کاربرد آن مستلزم گذشت ده سال بود. استات سلولوز بنوبهٔ خود، در این کار جانشین نیتروسلولوز شد و بعدها طی سالهای ۳۰ شاهد پیدایش شیشهٔ آلی هستیم که تأثیر زیادی در ساختمان سفینه‌های هوایی داشته است.

آمینوپلاست: رزینهایی که از راه تراکم اوره و فورمول تهیه شده‌اند بی‌درنگ موفقیت بزرگی به‌دست آوردند زیرا کدورت رزینهای فنوپلاست را نداشتند و خانوادهٔ آنها مواد تازه‌ای را تشکیل می‌دادند که تکمیل‌کنندهٔ مواد موجود در آن زمان بودند. گرچه ترکیبات ممکن در اثر تغییر یکی از دو ترکیب پایه‌ای آنها، از خانوادهٔ فنوپلاست بسیار کمتر بود، باز تنوع بسیار خوبی در آنها دیده می‌شد. ردیف این ترکیبات مثل فنوپلاستها در شکل صفحه، نی، ورق، رزینهای قابل ریخته‌گری و رزینهای آسیا شونده تولید می‌شدند. مواد به‌دست آمده نیز از نوع گرماسخت بودند، یعنی در اثر گرما، به‌طور قطعی

1. Benedictus

شکل قالب روزنرانی شده، نورد یافته خود را، پس از پلی‌کندانساسیون (تراکم مرحله‌ای) ـ چون هنوز نمی‌توان آن را بسپارش گفت ـ حفظ می‌کنند.

درواقع، طرحهای کلی تراکم و تراکم مرحله‌ای هرگز نتوانسته‌اند مدلهایی از زنجیره‌های مولکولی بدهند که ساختار آنها غیرقابل بحث باشد. در عمل، کار آنها تقریباً روی مواد سنتزی بود. سازه‌های اولیه، یک مولکول بسیار ساده داشتند که ممکن بود از عناصر بازی باشند. برای فورمول، آن را دیدیم. اوره $OC\langle^{NH_2}_{NH_2}$ یا از کربورکلسیم با تبدیل آن به سیانامید و فعل و انفعال آب روی آن، یا از گاز کربنیک کوره‌های پخت آهک و آمونیاک مایع به‌دست می‌آید.

اما ساخت اوره در عمل و بویژه واکنشهای تراکمی، سپس تراکم مرحله‌ای اوره ـ فورمول، بیشتر به تکنیکهای آمینوپلاستها نزدیک هستند تا به فنوپلاستها. درواقع، این روشها مبتنی بر کار تجربی هستند و در این کار، بعضی دستورالعملهایی که به تولید محصول رسیده‌اند تقریباً ثابت می‌مانند. بعدها خواهیم دید که مواد سنتزی، محصول نوعی عملیات خردمندانه هستند.

امتیاز تراکمهای نخستین اوره ـ فورمول از جنبهٔ کاربرد محصول آنها به‌عنوان مواد پلاستیکی، بی‌تردید بوسیلهٔ آقای هانس جونز[1] (اهل چک‌واسلواکی)، کمی زودتر از فریتس پولوک[2] اتریشی در سال ۱۹۲۰ به ثبت رسیده است، و در سالهای بعد دو کارخانهٔ انگلیس امتیاز عملی کردن آن را به‌دست آوردند. مواد جدید با نامهای پولوپا (pollopas)، که در همریخته نام مخترع آن است به بازار فرستاده شدند.

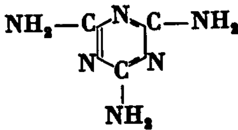
افزایش شمار خانوادهٔ آمینوپلاست: در خلال سالهای ۱۹۲۶ ـ ۱۹۲۹ بود که رزینهای اوره ـ فورمول بازار گسترده‌ای یافتند. این مواد شفاف می‌توانستند شیشه‌های واقعی آلی بسازند و مواد پرکننده و رنگدانه‌ها نیز به شیشهٔ ساخته شده، رنگهای تند و شادی می‌دادند که در متن کدر و یکنواخت فنوپلاستها، برجسته می‌نمود. مردم از نو احساس کردند که فهرست پلاستیکها باز هم طویلتر شده است.

خانوادهٔ آمینوپلاستها با تعویض اوره با ترکیبات دیگر نیتروژنی دارای ساختار مشابه، گسترش یافت. نزدیکترین ترکیب به اوره، ترکیب تیوره است که در آن گوگرد جانشین اکسیژن شده است $SC\langle^{NH_2}_{NH_2}$. تراکم آن با فورمول، رزینهایی می‌دهد که خواص بسیار مشابهی با اوره ـ فورمول دارند.

از میان همهٔ ترکیبات نیتروژنی، ملامین، تری‌سیانامیدی است که با گرم کردن دی‌سیانامید با

1. Hans Jones 2. Fritz Pollok

آمونیاک به‌دست می‌آید و به فرمول زیر پاسخ می‌دهد.



این ترکیب با فورمول واکنشی می‌دهد و با تثبیت سه مولکول از این آلدئید و این مشتق می‌تواند متحمل تراکم مرحله‌ای و حذف آب شود. به ساختار سه بعدی این درشت مولکول، بسیار نزدیک شده‌اند. نخستین امتیاز دراین‌باره در سال ۱۹۳۵ از طرف Société pour Industrie chimique de Bâle به ثبت رسید و ساخت این رزینها در امریکا در زمان جنگ شروع شد. پودرهایی برای ریخته‌گری از رزینها تا ورنی تهیه شد؛ اما آنها بویژه به‌عنوان اندود و چسب بازار گسترده‌ای، بویژه در صنعت چوب به‌دست آوردند.

رزینهای کومارون: سرانجام گروه دیگری از رزینها، متفاوت از گروههای پیشین، در جریان جنگ جهانی اول در آلمان در مقیاس صنعتی ساخته شدند. مادهٔ خام آنها دو ترکیب شیمیایی با فرمولی بسیار نزدیک به‌هم، کومارون ، و ایندن هستند که اکسیژن جای خود را به گروه CH_2 داده است. آنها حلالهای نفتا را تشکیل می‌دهند که با تقطیر قطرانهای زغال‌سنگ استخراج می‌شوند و این مخلوط به‌آسانی، تحت تأثیر اسید سولفوریک، بسپار می‌شود. تجربه‌ای که از ساختن انواع دیگر رزینها به‌دست آمده بود به شیمیدانهای آلمان امکان داد تا از این بسپارش برای ساخت فراورده‌های محلول در حلالهای آلی و روغنها و اجسام دارای خواص دی‌الکتریک بالا به‌آسانی الگوسازی کنند. این فراورده‌ها در صنعت رنگرزی و ورنی، در ساخت کائوچو به‌عنوان شکل‌دهنده، در تهیهٔ پارچه‌های آب‌ناپذیر، و بالاخره در صنایع برق به‌عنوان عایق به‌کار گرفته می‌شوند.

بعدها ساختار پلی‌کومارونها را بدلیل ساختار خطی آنها به مشتقات پلی‌وینیلی نزدیک دانستند. اما، طی نخستین دوران کاربرد آنها، هیچ اطلاعی از ساختار پلی‌کومارون در دست نبود. بااین‌حال، آنها در زمان خود به افزایش تنوع مواد پلاستیک کمک کرده بودند و این صنعت در سالهای ۲۰ تا ۳۰ مرحله‌ای از گسترش سریع را پشت سر گذاشت که مصرف‌کنندگان و خود تولیدکنندگان را به شگفتی آورد. علاوه بر صنایع مصرفی که دستخوش تحولات گاهی بسیار عمیق شده بودند، صنایع شیمی هم احساس می‌کرد که وارد عصر تازه‌ای می‌شود.

به‌دنبال ارزاتس: در آن زمان دوره‌ای سپری می‌شد که کشورهایی میل داشتند نوعی اقتصاد خودکفا را برای پایین آوردن کمبودهای تراز بازرگانی خود و آماده شدن برای یک اقتصاد زمان جنگ

به پیش ببرند. مواد پلاستیکی به‌عنوان «ارزاتس[۱]» برای جانشینی مواد طبیعی کمیاب یا بسیار گران در نظر گرفته شدند. ملتهای دیگر برای پرهیز از رقابتی که خطرناک تلقی شده بود، گسترش این صنایع را تجویز کردند. بااین‌حال، موفقیتهای مواد پلاستیکی نخستین دوران، تنها مدیون این نوع دلواپسی جهان صنعتی از وقوع یک فاجعه نیست.

این مواد کاربرد ویژهٔ خود را در تکنیکهای تولیدی سرشار از تحولی یافتند که از به‌کارگیری آنها منتفع می‌شد. دانشمندان، تکنسین‌ها و صنعتگران دراین‌باره اشتباه نکرده بودند. این رکود اقتصادی بود که به احتمال قوی آنها را آگاهانه، به کشف راههای تازه برای به‌کارگیری روشهای شیمی سنتز و آماده ساختن دومین عصری که پس از جنگ جهانی دوم می‌بایست پیروز شود واداشته بود. این تغییر زمانی ممکن می‌شد که نه‌تنها پژوهش آزمایشگاهی، واکنشهای تازه‌ای را برای گسترش امکانات تولیدی آماده کرده باشد، بلکه همچنین برای بررسی ساختار مواد و تعیین ویژگیهای مورفولوژیکی آنچه که می‌خواستند ایجاد کنند، وسایل تازه‌ای فراهم شده باشد.

وسایل نوین علمی صنایع شیمی

انتقال از آزمایشگاه به کارخانه در پایان نخستین جنگ جهانی تا زمان کنونی، یک فرایند عمومی در همهٔ این رشته‌های گوناگون صنایع شیمی بوده است، و برای اینکه تصوری از گستره و بازتابهای آن داشته باشیم از آوردن چند نمونه استمداد می‌کنیم. در واقع در جریان سالهای ۲۰ تا ۵۰، صنعت تازه‌ای زاده شد و به یکی از عوامل اصلی تحول همه تکنیکهای تولید، و خدمات، تبدیل گردید، که همراه با تکنیکهای ارتباطات، مبانی اقتصاد و سیاست و نیز شرایط زندگی جمعی یا فردی را دستخوش تغییراتی کرد.

این پدیده، چیز تازه‌ای نیست و ما با آن طی مراحل پیشین آشنا شده‌ایم. و آن، طی سه یا چهار دهه، شدت بی‌سابقه‌ای یافت و منجر به قطع واقعی با همه روشهای سنتی باقیمانده از تکنیکهای شیمی شد. این پدیده طبعاً پس از سالهای ۵۰ هم ادامه یافت، اما دستاوردهای اساسی و بزرگ آن، بویژه در سالهای ۲۰ و ۳۰ بوده است. این حرکت به‌طور برگشت‌ناپذیری ادامه یافت و برخلاف تصورات موجود در اواخر سدهٔ نوزدهم، ساختارهای صنایع شیمی دیگر هرگز منجمد نشدند.

برای ساده کردن مسأله، می‌توان گفت که وسایل جدید، در آغاز، تولید صنعتی ترکیبات متعددی را ممکن ساختند که در آن زمان در کاتالوگهای شیمیدانها ثبت شده بود اما در بیرون از آزمایشگاه، هیچ کاربردی نداشتند. همچنین آنها امکان به‌دست آوردن اطلاع دقیق از ساختار درشت‌مولکولهای

---

۱. Ersatz: واژهٔ آلمانی که برابر مواد جبرانی یا جانشینی است. ـ م.

طبیعی و مصنوعی را فراهم ساختند. سرانجام تهیهٔ صنعتی آنها را بروش سنتز، عملی کردند.

واکنش گرینیار: باید توجه داد که صنعتگران برای بسط تعداد فراورده‌های خود، واکنشهایی را، بویژه در شیمی آلی به‌کار می‌گرفتند که در سی یا چهل سال پیش، شناخته شده بودند و در بیرون از آزمایشگاه کاربرد آنها آغاز شده بود.

در همین رده باید از نمونهٔ واکنش گرینیار یاد کنیم که تولید مشتقات آلی منیزیم‌دار مختلط بوسیلهٔ آن انجام گرفت. شروع کارهای آقای ویکتور گرینیار در سال ۱۹۰۰ بود، اما آنها از خاصیت آن که در سال ۱۸۴۹ بوسیلهٔ ادوارد فرانکلند[1] شیمیدان انگلیسی معلوم شده بود ملهم می‌شدند. این خاصیت در نمکهای هالوژنید آلی، مثلاً یدوراتیل C_2H_5I نیز بود و فلز روی را تنها با گرم کردن در خود تثبیت می‌کردند. ترکیب ناپایدار $C_2H_5 - ZnI$ در هنگام تقطیر، که برای باقی گذاشتن یک ارگانوزنسیک متقارن، در این مورد $C_2H_5 - Zn - C_2H_5$ لازم بود تجزیه می‌شد. این اجسام، مصرفی نداشتند، زیرا در هوا خودبه‌خود اکسید می‌شدند.

حدود پنجاه سال بعد، آقای باربیه که استاد گرینیار در لیون بود کوشید تا در مشتقات فرانکلند به‌جای روی، منیزیم را تثبیت کند. آقای گرینیار که با این نمونه، طرز کار را شناخته بود توانست در سال ۱۹۰۰ ترکیب آلی منیزیم‌دار مختلط با فرمول $R - Mg - X$ را به‌دست آورد. وی برای این کار، عنصر منیزیم را روی یک ترکیب آلی هالوژندار تثبیت کرد. این واکنش افزایشی با ریختن آرام ترکیب هالوژندار در اتر بی‌آبی که، تراشه‌های منیزیم را در خود داشت به‌آسانی انجام گرفت. محلول اتر به‌دست آمده، همان واکنشگر گرینیار است که خصلت عمومیت داشتن آن فوراً آشکار شد.

در واقع، وی بنیان غیرمشخصی، R، یک هالوژن (کلر، برم، ید) X را نشان داده بود، و حلال می‌توانست یک اتر ـ اکسید دیگر باشد. این واکنشگر می‌توانست به‌عنوان یک عامل سنتزی جهت تهیهٔ کربیدها، مشتقات هالوژنی، اسیدها، الکلهای نوع اول، دوم یا سوم، ستونها به‌کار رود، که در آنها بنیان اولیه می‌توانست با دیگر بنیانهای آلی متحد شود.

پیوند دوگانهٔ میان کربن و اکسیژن اکثر عوامل آلی، آلدئید، ستونها، کلرور اسید (انیدرید کلر)، یا گاز کربنیک، آمادگی ویژه‌ای برای تثبیت واکنش‌گر گرینیار دارد و سپس در اثر هیدرولیز، در تولید مولکولی که بنیانهای گوناگون را روی یک گروه عاملی جدید متحد می‌سازد.

از میان پژوهشهای فراوان آزمایشگاهی، که در سایه واکنشگر گرینیار انجام گرفته است می‌توان در اینجا از پژوهشهای ف. س. کیپینگ[2] انگلیسی در ۱۹۰۴ روی مشتقات آلی سیلیسیم یاد کرد که حدود چهل سال بعد به ساخت سیلیکونها، که بعدها دربارهٔ آن سخن خواهیم گفت، انجامیدند.

1. E. Frankland 2. F. S. Kipping

پس از این کشف گرینیار، بحث‌های نظری فراوانی دربارهٔ آن درگرفت اما در اهمیت این کشف، تردیدی نبود. آقای گرینیار در سال ۱۹۱۲ سومین جایزه نوبل شیمی را که به یک فرانسوی تخصیص داده شده بود دریافت، و آن را با پل ساباتیه تقسیم کرد. گرینیار نه‌تنها روش فوق‌العاده انعطاف‌پذیر و پرثمری برای سنتز اختراع کرده بود، بلکه راهی هم برای پژوهش گشوده بود که مدتها برای کشف همهٔ این روش، دنبال می‌شد. آقای ادمون بلز[1] نیز همین اصلاحی را که آقای گرینیار در کشف باربیه ایجاد کرده بود، در روش فرانکلند وارد کرد. وی مخلوطهای آلی دارای روی تهیه کرد که خواص آنها خواص مخلوطهای آلی منیزیم‌دار را با کمی تفاوت تداعی می‌کرد. وی آنها را روی ستونها اثری نداد. می‌توان آنها را از مادهٔ اولیهٔ نوعی کلرور اسید تهیه می‌کرد.

ضدکوبش، ضداکسیژن: این زنجیر تا مشتقات لیتیم کارل تسیگلر[2] و گیلمن[3] در سال ۱۹۳۰ پیش رفت و واکنش‌پذیری آن روی گروههای گوناگون کربونیل، نقایص واکنشگر گرینیار را جبران می‌کرد. سرانجام این زنجیر روی ترکیبات آلی سرب‌دار بسته شد. از میان این ترکیبات، سرب تترااتیل، پس از کارهای میجلی[4] و بوید[5] در ۱۹۲۱ روی ضدکوبشها برای بالا بردن عدد اوکتان بنزین موتورهای احتراقی، اهمیت فراوان یافت.

ترکیب سرب تترااتیل را با فعل‌وانفعال کلروراتیل روی آلیاژی از سرب و سدیم به‌دست می‌آوردند. اما روش دیگر تهیهٔ آن عبارت بود از تأثیر واکنشگر گرینیار روی کلرور سرب. ترکیب مورد نظر از کلرور و یدور منیزیم و منیزیم آزاد به‌دست می‌آمد.

تأثیر کاتالیزوری منفی سرب تترااتیل را به تأثیر «مواد ضداکسیژن» که آقایان شارل مورو[6] و دوفرس[7] در همان زمان (۱۹۲۲) آنها را مطالعه می‌کردند نزدیک کرده بودند.

مواد ضداکسیژن این دو شیمیدان فرانسوی، به‌طورکلی، چند ترکیب آلی دارای یک عامل فنولی بودند که به‌مقدار بسیار اندک (*trace*)، به‌طور چشمگیری از خراب شدن اجسامی که در هوا اکسید می‌شوند، مانند آکرولئین، بعضی آلدئیدها، اسانس تربانتین، روغن برزک و غیره، جلوگیری می‌کردند. از آنها بی‌درنگ برای نگاهداری طولانی این مواد استفاده کردند و فراورده‌هایی هم که بعداً ساخته شدند، از قبیل کربورهای اتیلنی و پلی‌اتیلنی بنزینهای حاصل از کراکینگ گرمایی و کائوچوهای سنتزی، زیر پوشش آنها قرار گرفتند.

واکنش فریدل-کرافتس: یکی از واکنشهای کاتالیزوری که از سدهٔ نوزدهم شناخته شده بود در ردیف روشهای ساخت سدهٔ بیستم قرار گرفت. از سال ۱۸۵۰ در پرتو کارهای فرانکلند دانستند که

1. E. Blaise 2. K. Ziegler 3. Gilman 4. Midgley 5. Boyd 6. Ch. Moureu
7. Dufraisse

چگونه از مشتقات هالوژنی برای تهیهٔ کربورهای بالاتر از کربورهای آغاز واکنش، مثلاً اتان، از یدید متیل، پروپان، از یدید متیل و یدید اتیل استفاده کنند. خود هالوژن با واکنش یک فلز قلیایی برداشته می‌شود و دو بنیان با یکدیگر متحد می‌شوند. با روش مشابهی فریدل و زیلوا[1] برای نخستین بار، گلیسیرین، تری الکل، را در سال ۱۸۷۳ از طریق سنتز تهیه کردند.

چند سال بعد، در ۱۸۷۷ آقایان فریدل و کرافتس متوجه شدند که کلرور آلومینیم می‌تواند در این نوع واکنش به‌عنوان کاتالیزور عمل کند و بویژه زمانی‌که یک هالوژنور الکوییل، مانند کلرور متیل CH_3Cl، در حضور یک کربور آروماتیک، مثلاً بنزن گرم باشد. در این واکنش حذف اسید کلریدریک به‌حساب یک هیدروژن بنزن است که بنیان متیل، جایش را می‌گیرد و تشکیل تولوئن $C_6H_5CH_3$ را می‌دهد. کلرور آلومینیم در پایان واکنش، مصرف نشده می‌ماند. این یکی از نخستین واکنشهای کاتالیزوری است که در صنایع ساخت ترکیبات آلی به‌کار رفته است. وقتی بدانیم که این واکنش می‌تواند با مشتقات هالوژنی هر یک از کربورهای آلیفاتیک (زنجیری) انجام گیرد متوجه می‌شویم که فایدهٔ آن بسیار بیش از تولوئن تنهاست. از جمله، ترکیبات اشباع نشده با پیوند دوگانهٔ اتیلنی، بعدها منبع تولید فراورده‌های بسیار شدند.

واکنش فریدل و کرافتس زمانی به یک روش تولید صنعتی تبدیل شد که چهل سال از کشف آن گذشته بود. این واکنش اساس نخستین کوششهای کراکینگ کاتالیزوری ـ ابتکار آقای مک آفی در ۱۹۱۵ ـ بود. اما این روش به‌علت هزینهٔ تولیدی بسیار گزاف کلرور آلومینیم کنار گذاشته شد. در موقعیتهای زیاد دیگری این واکنش کلرور آلومینیم راه را برای ساختهای شیمیایی بسیار باز کرد، حتی به‌محض آشنایی با این راه، روشهای دیگری برای رسیدن به همین اجسام، خود را تطبیق دادند.

زمینهٔ مشترک روشها: این واکنشها و واکنشهای زیاد دیگری به دنبال آن، به‌فهرست واکنشهایی افزوده شدند که صنایع شیمیایی از مدتها پیش آنها را به‌کار می‌برد، نظیر نیتروژندهی، دو نیتروژندهی (دی‌ازوتاسیون)، گوگرددهی (سولفوراسیون)، ذوب قلیایی و غیره، و نیز شمار زیادی از آنها برای ساخت رنگ‌های سنتزی، کاربرد صنعتی یافتند. در فاصلهٔ سالهای ۱۹۱۰ تا ۱۹۴۰، اهمیت اکثر آنها در صنعت، تقریباً همگام با تنوع راههای گوناگونی که در آزمایشگاه برای اجرای این عملیات بسیار دقیق کشف می‌شدند، افزایش یافت. کاربرد آنها غالباً متضمن نیاز به وسایل بزرگتری بود، که در ابتدا تنها برای تهیهٔ مقدار بسیار محدودی از این ماده ساخته شده بودند که برای جداسازی مادهٔ مورد نظر یا با روشهای فیزیکی: استخراج، تقطیر، تبلور و غیره، عمل می‌کردند یا با واکنشهای

1. Silva

شیمیایی. این بررسی‌ها که در آزمایشگاههای مؤسسات بزرگ انجام می‌گرفتند، گاهی به کاربرد آگاهانهٔ روشهایی می‌انجامید که زمانی برای رفع نیازهای صنایع سنتزی، ابتکار شده بودند؛ از گسترش هیدروژندهی کاتالیزوری، که همان‌طور که دیده شد، برای صنعت نیتروژن آغاز شد، گرفته تا عمل آوردن فراورده‌های نفتی که در همان زمان راههای تازه‌ای را در پیش گرفته بود.

نمونه‌ای از سالهای ۱۹۳۰ بخوبی نشان می‌دهد که چگونه انتقال آزمایشگاه به کارخانه، رفته‌رفته رها کردن واکنش نخستین را به سود روشهایی با بازده بیشتر برای ساخت یک ردیف تمام فراورده‌هایی القا می‌کند که واقعاً شاخهٔ جدیدی از صنعت شیمی را تشکیل می‌دهند.

الکلهای چرب «سولفوندار»: بحث بر سر پیدایش فراورده‌های تازهٔ ترکننده و پاکسازی است که بدون کنار گذاشتن فراورده‌های رایج پیش برای کارهای خانگی و کارخانه، پایه‌های تکنیکهای این رشته را کاملاً عوض کرده‌اند.

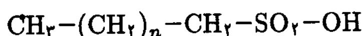
علاوه بر تولید سنتی صابونها، این صنعت قادر شده است که چگونه مواد چرب را چه برای تهیهٔ فراورده‌های مصرفی، و چه برای به‌دست آوردن فراورده‌های تازه مواد فعال در سطح، به راههای گوناگونی تهیه کند. بدین‌ترتیب، درصدد از میان بردن پیوند دوگانهٔ اسیدهای چرب وارد شده در ترکیب گلیسریدها برآمدند. این اسیدهای اشباع نشده، آسان اکسید می‌شوند؛ و طعم و بوی روغنهای خود را بد می‌کنند. در سال ۱۹۰۱ آقای نورمان[1] توانست آنها را تحت عمل هیدروژندهی کاتالیزور با فشار قرار دهد. این روش، حدود سال ۱۹۱۰ صنعتی شد و روغنهای خوراکی و نیز صنعتی را هیدروژن دادند. این روغنها به چربیهای نرم تبدیل شدند که بعضی از آنها در ساخت مارگارین (امولسیون چربی در آب یا شیر)، که اصول ساخت آن را آقای ایپولیت مژ ـ موریه[2] حدود سال ۱۸۷۰ اختراع کرده بود، به‌کار گرفته شدند. مارگارین و فراورده‌های مشابه برمبنای روغنهای گیاهی، که در اواخر سدهٔ نوزدهم بسیار رواج یافت و در همهٔ کشورها موجب وضع مقررات خاصی شد، در تودهٔ مردم مصرف فراوان یافت.

از سوی دیگر، گلیسریدهای دیگری برای اینکه مثلاً در رنگرزی به‌کار گرفته شوند به‌طور خاصی عمل آورده شدند. روغن کرچک که تری گلیسریدی از یک اسید چرب بالای بسیار ویژه، اسید ریسینولئیک است، اگر با اسید سولفوریک عمل آورده شود، به سولفوریسینات تبدیل و در آب حل می‌شود.

طی سالهای ۱۹۳۰ توجه آزمایشگاهها، بویژه آزمایشگاه‌های کارخانه‌های بزرگ آلمان روی خاصیت استرهای سولفوریک که ساده‌تر از مخلوط کمپلکسی بودند که از روغن کرچک حاصل

1. Normann 2. H.Mége-Mouriez

می‌شد، تمرکز یافت. بحث بر سر نتیجهٔ اثر اسید سولفوریک روی الکلهای چرب با وزن مولکولی زیاد است، فراورده‌هایی که در آن زمان به اشتباه، الکلهای چرب سولفوندار نامیده می‌شدند. ساختمان این ترکیب طبق فرمول زیر بود:



$$CH_3-(CH_2)_n-CH_2-SO_2-OH$$

که در آن n بین ۶ تا ۲۰ تغییر می‌کرد و جالبترین آنها C_{12} و C_{14} بودند. زنجیری که اشباع نمی‌شد مربوط به الکل اولئیک (C_{18}) بود.

الکلهای چرب سولفوندار، از نظر صنعتی خواص بسیار جالبی داشتند. آنها که در آب محلول بودند، ترکننده، کف‌کننده و پاکساز بودند، و نیز این مزیت را داشتند که این خواص را در مجاورت نمکهای کلسیم و فراورده‌های دیگر معدنی محلول در آبهای معمولی، از دست نمی‌دادند. این مجموعهٔ خواص آنها را عوامل مورد نیاز صنایع گوناگونی: مواد پاک‌ساز خانگی و صنعتی، صنایع نساجی، رنگ‌سازی، صنایع پوست و چرم، کائوچوی سنتزی، گرد حشره‌کش و مواد اشتعال‌ناپذیر، شناورساز گردهای معدنی و غیره، ساخته بود.

چشم‌اندازهای کاربرد این نوع فراورده جالب توجه بودند. اما لازم بود مشکلی را برطرف ساخت. الکلهای چرب طبیعی بسیار کمیاب بودند. لازم بود وسایلی برای تولید آنها با احیای اسیدهای مربوطه یا استرهای آنها یافت. الکلهای چرب بسیار مفید، به شکل استرهای اسیدهای چرب، با وزن مولکولی زیاد، در دسته‌ای از ترکیبات طبیعی، که با گلیسریدها تفاوت دارند (زیرا گلیسرین در آن دقیقاً جای خود را به مونوالکلهای دراز زنجیر سپرده است)، جای دارند و نیز مومی هستند. از میان آنها، اسپرماستی یا موم کافوری، که از سر ماهی عنبر به‌دست می‌آید، در آن زمان در صنعت داروسازی کاملاً شناخته شده بود.

نخستین وسیلهٔ هیدروژندهی موم کافوری، استفاده از نوعی واکنش آزمایشگاهی بود به نام واکنش بووو و بلان، که در آن زمان رواج داشت، که در مجاورت یک الکل معمولی (اتیلیک، بوتیلیک یا آمیلیک) و سدیم انجام می‌گرفت. با این واکنش، الکلات سدیم و هیدروژن نوزاد تولید می‌شدند که استری را که در الکل چرب عمل شده بود، فوراً احیا می‌کردند.

تراست آلمانی I. G. Farben Industrie در سال ۱۹۳۱ امتیاز به‌کارگیری این روش را به ثبت رسانید. این امتیاز مورد اعتراض قرارگرفت زیرا آقایان بووو و بلان در سال ۱۹۰۸ روش خود را دراین‌باره منتشر کرده بودند و در نتیجه امتیاز این تراست باطل شد. اما احیای شیمیایی، دیگر برای این تراست آلمانی چندان سودمند نبود. این مؤسسه روش هیدروژندهی در فشار زیاد و در

مجاورت کاتالیزورها را به ثبت داد که با آن، سیر کردن یا سیر ناکردن پیوندهای اتیلنی، به دلخواه انجام‌پذیر بود.

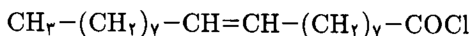
الکلهای چرب «سولفوندار» پایهٔ صنعت نوین مواد پاکسازی را تشکیل می‌دهند که از استرهای سنتی گلیسرینی که آقای شورول در یک سده پیش آنها را طبق قاعده به‌دست آورده بود، نیستند. این صنعت در بعضی از کشورها به‌علت جنگ جهانی دوم متوقف شد و پس از آن بی‌درنگ گسترش یافت.

مواد جدید فعال در سطح: گسترهٔ مواد خام برای ساخت مواد فعال در سطح، باز هم در سایهٔ روشهای نوین ساخت آنها، که در رشته‌های دیگر صنعت شیمی رواج داشتند، بازتر شد. در همان زمانی‌که ساخت الکلهای چرب بالا آغاز شد، نوعی مادهٔ پاکسازی، بسیار متفاوت از مواد پیشین، در سال ۱۹۳۱ به‌نام Igepon T بوسیلهٔ I. G. Farben Industrie به بازار آمد.

یکی از مواد اساسی آن، اتیلن بود که در آن زمان با هیدروژندهی دقیق استیلن به دست می‌آمد و تولید آن از کربور، اقتصادیتر بود. برای آغاز اکسایش اتیلین به اکسید اتیلن با فرمول $CH_2—CH_2$ (با پل O) که بسیار واکنش‌پذیر است، روشهای گوناگونی در آن زمان شناخته شده بودند. بویژه در مجاورت بی‌سولفیت سدیم، اکسید اتیلن ترکیبی افزایشی می‌دهد که بنیان الکل آن روی متیل آمین اثر می‌گذارد. در اینجا حذف یک مولکول آب و تشکیل یک ترکیب آمینی کمپلکس


تراز متیل آمین در میان است: $CH_3-NH-CH_2-CH_2-SO_3Na$

این آمین که در مجاورت سود بر کلرور اسید اولئیک:


$$CH_3-(CH_2)_7-CH=CH-(CH_2)_7-COCl$$

اثر می‌گذارد با حذف کلرورسدیم و آب، تشکیل مشتق سولفونداری از آمید با زنجیر طویل اتیلنی می‌دهد. اما این فراورده که با نام ponT [1] فروخته می‌شود اولین ترکیب از ردیف بلندی است که خواص ترکنندگی، کف‌کنندگی، پاکسازوامولسیون کنندهٔ آن دربها را بروی صنایع گوناگونی گشوده است.

این نمونهٔ دنباله طویلی از واکنشها، که برمبنای یک هیدروکربن ساده، اتیلن، و ماده‌ای که از یک جسم طبیعی، اسید اولئیک گرفته شده است قرار دارند، نشان می‌دهد که در سالهای ۳۰، همان تکنیکی که گرایش به عصر سنتزهای بزرگ صنعتی داشت به چه اوجی دست یافته بود.

مواد خام طبیعی، گرچه بتنهایی به‌کار گرفته می‌شدند می‌توانستند رشد ساخت مواد فعال در سطح را محدود کنند، زیرا فراورده‌هایی با گوناگونی روزافزون وکاملاً شناخته شده به بازار می‌فرستادند

سطح را محدود کنند، زیرا فراورده‌هایی با گوناگونی روزافزون و کاملاً شناخته شده به بازار می‌فرستادند و نیز انگیزهٔ افزایش تقاضای صنایع مصرفی بودند. در آن زمان روشهای کلاسیک عمل آوردن مواد چرب سنتی، استخراج و خالص کردن اجزای سازندهٔ آنها و استفاده از آنها در اشکال شیمیایی بسیار گوناگون، هنوز دور از دسترس بود؛ اما چنانچه کارایی روشها پیوسته بیشتر نمی‌شد، منابع فراورده‌های طبیعی نمی‌توانستند پاسخگوی اشتهای روزافزون صنایع تبدیلی باشند.

در واقع، گرچه تکنیکهای صنایع اخیر، پیوسته در تحول بودند، چشم‌اندازهای ذخیرهٔ مواد خام نیز چنین می‌نمود که به‌طور پایان‌ناپذیری گسترده می‌شوند. منابع نوینی برای صنعت هیدروکربنهای پارافینی طبیعی یا سنتزی یافت شدند.

تکنیکهای جدید چاره‌کاری نفتها، کراکینگ گرمایی و بعد کراکینگ کاتالیزوری که در سالهای ۳۰ و ۴۰ به‌کار گرفته شدند (رجوع کنید به صفحهٔ ۸۴۰)، دستیابی به مقادیر چشمگیر هیدروکربنهای اتیلنی با وزن اتمی نسبتاً کم (اتیلن و همرده‌های بالاتر) را کاهش دادند. وانگهی فراورده‌های مشابهی برمبنای زغال (حتی بسیار فقیر) و بخارآب با روشهای سنتزی آقایان ف. فیشر و هـ. تروپش[1] با صبر و بردباری در سالهای ۱۹۲۳ تا ۱۹۳۵ به‌دست آمدند که بعداً به آنها خواهیم پرداخت.

در اواخر سالهای ۴۰ برای تهیهٔ الکلهای چرب سنتزی روشهای گوناگونی در صنعت، مورد استفاده قرار گرفت که یا برپایهٔ عمل آوردن هیدروکربنهای اشباع نشده به توسط مخلوطی از CO و هیدروژن در مجاورت کاتالیزورگر، اکسوسنتز، یا واکنش اکسو، در ممالک متحدهٔ امریکا بود یا با تهیهٔ مستقیم آن در نسبت ۵۰ یا ۶۰٪ به توسط نوعی روش فیشر- تروپش با نام سینتول Synthol در آلمان. باز می‌توان گفت که ساخت سولفاتهای آلکیلی (نام کنونی به‌جای نامهای غلط الکلهای چرب سولفوندار) نیز با راههای تازه تولیدی انجام گرفته است. مثلاً اولفینهای (کربورهای اشباع نشده) راست زنجیر بدون شاخه، که در کراکینگ پارافین (کربورهای اشباع شده) به‌دست می‌آیند می‌توانند مستقیماً یک مولکول اسید سولفوریک را روی پیوند دوگانه تثبیت کنند؛ و بدین‌ترتیب، بدون اینکه از پیش، یک بنیان الکل روی زنجیر به‌وجود آمده باشد، سولفات آلکیل ثانوی بدهند. اختراع به ثبت رسیدهٔ شل در امریکا در سال ۱۹۵۰ به یک مادهٔ پاک‌ساز مربوط می‌شد که به‌نام تیپول teepol به بازار آمد و با روش بالا ساخته می‌شد. در این دوران دیده شد که ساخت این ترکیبات، موقعیتی برای ارزش یافتن مواد جانبی صنایع نفت فراهم آورد.

1. Tropsch

Surfactant یا tensio-actifs: در سالهای ۱۹۳۰ و ۱۹۶۰ مفهوم مواد پاک‌ساز بزودی برای معرفی تعداد روزافزون فراورده‌های صنعتی که از آزمایشگاههای کارخانه‌های بزرگ بیرون می‌آمدند و نیز منظور داشتن مشخصات هر یک از آنها، نارسا تلقی شد. این پیامد دیگری از این گسترشها، و تشکیل یک رشتهٔ فنی ـ دانشی تازه‌ای بود و می‌بایست نامی برای آن بیابند که همگان آن را بپذیرند. مفهوم agents tensio-actifs (مواد فعال در سطح) در آغاز در فرانسه به موادی گفته می‌شد که سطح آنها فعال باشد، سپس در آلمان به فعالیت مویینگی توجه شد و در ممالک متحد امریکا، اصطلاح surface-active-agentsرا پذیرفتند که واژهٔ surfactantsاز آن ساخته شد.

رشته‌ای که با این عناوین گوناگون تشکیل شد بر روی چند پایه از شیمی و فیزیک عمومی قرار داشت. هدف آن گسترش دادن و تحکیم این پایه‌ها با کوشش در تعریف رفتار مولکولی مواد موجود در سطح مشترک مایع ـ مایع، و نیز مشخص کردن نوع و کنترل خواص ویژهٔ آنها: حلالیت، پایداری شیمیایی در حلال، قدرت ترکنندگی، امولسیون شوندگی، پاشیدگی، کف‌کنندگی، پاکسازی و غیره، و نیز آثار زیست‌شناسی آنها بود.

این ترکیبات را برپایهٔ رفتارشان در محلول رده‌بندی کرده‌اند. ترکیباتی که کمتر فعال هستند مهمترین ردیف را تشکیل می‌دهند و شامل نمکهای قلیایی اسیدهای چرب، سولفاتهای قلیایی، روغنهای سولفوندار و فراورده‌های دیگری مانند آمیدها و مشتقات سولفوندار کربیدهای آروماتیک متصل به کربیدهای آلیفاتیک می‌شوند. در ردهٔ ترکیبات دارای کاتیونهای فعال، آمیدها، بویژه کلرورهای آمونیم جای دارند که در آنها نیتروژن چسبیده به زنجیرهای راستخط یا حلقه‌ای است. سرانجام، در ردهٔ ترکیبات یون ناشونده، بویژه مشتقات اکسید اتیلن جای دارند.

یک نامگذاری جدید و نیز نمایش گرافیکی ساده‌ای از مولکوهای فعال انجام گرفته است. این رشته نخستین گسترش خود را در اواخر سالهای ۴۰ داشته است و مانند دیگر رشته‌های جوان،مفاهیم کلی، گفتار و نوشتار مربوط به آنها در دهه‌های بعد، همواره دستخوش تحول بوده‌اند.

زیست‌شناسی و صنایع شیمیایی

نمونهٔ بسیار جالب دیگر از تنوع کوششهای صنعتی در نیمهٔ نخست سدهٔ بیستم، آغاز و گسترش سریع زیست‌شیمی و داروسازی است. در این زمینه، روشها بسیار گوناگون و متمایز از یکدیگر هستند، اما خط مشترکی بین خود دارند. همهٔ آنها نتیجهٔ بررسیهای آزمایشگاهی برای جداسازی ترکیبات مواد طبیعی تشکیل‌دهندهٔ جوهرهٔ فعال آنها از لحاظ پزشکی و تکثیر مصنوعی آنهاست.

با آغاز این سده، شیمیدانها در برابر خود تعداد روزافزونی از ترکیباتی را یافتند که فرمول شیمیایی آنها چنان با یکدیگر متفاوت هستند که برای تولید دوبارهٔ آنها همهٔ منابع آنالیز و سنتز شیمیایی باید به‌کار گرفته شوند. به نسبتی که زیست‌شیمی توان می‌یافت در افزایش منابع آزمایشگاهی بقصد دستیابی به مراحل تازه جهت استخراج، خالص کردن و دوباره‌سازی این ترکیبات فعال، تلاش بیشتری انجام می‌گرفت. بنابراین، نخستین آگاهیهای زیستی به انگیزهٔ بسیار نیرومندی برای پیشرفت خود دانش شیمی تبدیل شد. بدین‌ترتیب، نخستین ساختهای صنعتی دارو پدید آمد و با گذشت چند دهه، نه‌تنها اهمیت اقتصادی فراوان یافت، بلکه در سلامت گروههای وسیع تودهٔ مردم و نیز تحول دموگرافیک کل جهان تأثیر اساسی بر جای گذاشت.

در واقع روابط شیمی و داروسازی بسیار قدیمی است و از سدهٔ نوزدهم، که نخستین الکالوئیدها از گیاهان مربوطه گرفته شدند، نشأت می‌گیرد. در سدهٔ شانزدهم، پاراسلوس و شاگردان وی کاربرد مواد معدنی را به‌عنوان دارو و در جنب فراورده‌های طبیعی سنتی دارای منشأ گیاهی یا حیوانی، پایه گذاردند. شیمی دارویی به مدت دو سده در خود علم شیمی نقش اساسی داشته است. ترکیبات گوناگون معدنی که کاتالوگ شیمیدانها را غنی کرده‌اند در آزمایشگاههای داروسازانی کشف و تولید شدند که تا پایان سدهٔ هجدهم، جز در چند مورد، تنها به ساخت نمکها و ترکیبات شیمیایی خشنود بودند.

از جملهٔ تغییرات اولیه‌ای که در سدهٔ نوزدهم طرحریزی شد، از یکسوی کاربرد داروی بیهوشی، و از سوی دیگر ساخت تب‌برها و داروهای ضددرد بود.

قدرت بیهوش‌کنندگی بعضی داروهای شیمیایی تقریباً در همان زمانی‌که شناخته شدند تبلیغ شد. از این زمره داروها، پروتوکسید نیتروژن N_2O بود که گاز خنده‌آور نام دارد، و حدود سی سال پس از کشف آن به‌وسیله پریستلی، در ادامهٔ تجربیات دیوی به‌کار گرفته شد. در سال ۱۸۴۴ از این گاز برای نخستین‌بار برای کشیدن دندان در انگلستان استفاده کردند. دو سال پس از آن، اتر سولفوریک بنوبهٔ خود در ممالک متحدهٔ امریکا برای همین کار در جراحی غده‌ها به کار گرفته شد. که در زمان خود، کشف بزرگی در جراحی بود.

کاربرد کلروفرم نیز سرگذشت مشابهی دارد. در سال ۱۸۴۷ در زایمان به‌کارگرفته شد و زمانی‌که آقای جان اسنو در سال ۱۸۵۳ از آن در جراحی ملکهٔ ویکتوریا استفاده کرد، کاربرد آن قانونی شد.

همهٔ این ترکیبات، در آغاز، مصرف چندانی نداشتند. کاربرد آنها به‌عنوان داروی بیهوش‌کننده، درگرو روشهایی بود که آنها را بدون هرگونه ناخالصی، تهیه کنند. این توفیق به‌طورکلی حدود ۱۸۷۰

به‌دست آمد. در این زمان کاربرد داروهای ضدعفونی نیز، درپی کارهای آقای پاستور آغاز شده بود. پس از اینکه آقای جوزف لیستر در سال ۱۸۶۷ جهت احتیاطهای لازمه در جراحی عفونتهای میکروبی، فنول را به‌کار برد این ماده به‌عنوان رایجترین مادهٔ ضدعفونی به‌کار گرفته شد.

شیمی برای فراورده‌هایی که به نیازهای جدید پاسخ می‌دادند آغوش خود را کاملاً باز کرده بود. از جملهٔ این فراورده‌ها در نیمهٔ دوم سدهٔ نوزدهم می‌توان از: ترکیبات معدنی نظیر کلریدهای روی یا جیوه، اسید بوریک، پرمنگنات پتاسیم یا ترکیبات آلی از قبیل یدوفرم، تیمول، اسید سالیسیلیک نام برد.

ساخت صنعتی اسید سالیسیلیک، پس از سال ۱۸۴۷، زمانی‌که آقای کولبه روشی را برای ساخت آن از فنول کشف کرد، بود، بدون شک نخستین تولید صنعتی فراورده‌های دارویی به‌شمار می‌رود. اما خواص تب‌بر آن تا سال ۱۸۷۵ کشف نشد. داروسازی از همان آغاز سدهٔ نوزدهم الکالوئیدهای خالصی در اختیار داشت: مورفین که آقای زرتورنر[1] در سال ۱۸۰۶ آن را از اوپیوم به‌دست آورده بود؛ کینین که در سال ۱۸۲۰ بوسیلهٔ آقایان پ. ژ. پلتیه و ژوزف کاوانتو[2] شناخته شد؛ و کمی بعد، سنکونین و دیگر آلکالوئیدهای گنه‌گنه؛ پاپاورین در ۱۸۵۰؛ و کوکایین به‌وسیله نیمان[3] در ۱۸۶۰ و غیره.

نخستین ساخت داروهای شیمیایی: تولید سیستماتیک و نیم‌صنعتی همهٔ این آلکالوئیدها از همان آغاز کشف آنها شروع شد و گیاهان بومی حامل آنها، ارزش اقتصادی زیادی یافتند. علاوه بر این، نخستین تولید آنها سبب شد که هدفهای صنعت داروسازی تغییر کند و به‌سوی مقاصد صنعت شیمی گرایش یابد.

زمانی‌که شیمیدانهای آلمان نخستین مواد ضددرد را با روش سنتز ساختند، گام بزرگی به پیش برداشته شد. این پیروزی بسیار سریعی بود که در سایهٔ کاربرد اسید سالیسیلیک به‌عنوان مادهٔ اصلی به‌دست آمد. در سال ۱۸۸۴ آقای کنور[4] توانست استری از اسید سالیسیلیک را با یک هیدرازین تراکم دهد و مشتقی از پیرازولون به‌دست آورد که بی‌درنگ با نام آنتی‌پیرین وارد بازار شد. مشتقی از این ماده سبب شد که کارخانهٔ هوخست داروی دیگری از همین خانواده بسازد. این دارو ـ پیرامیدون تقریباً در همان زمانی ساخته شد که آقای کاله[5] نخستین مشتق آنیلین با خاصیت ضددرد را، که داروی ضدتب بود، از اثر اسید استیک در گرما تهیه کرد. کمی پس از آن، بایر مشتق دیگری از آنیلین، فناستین، را ساخت.

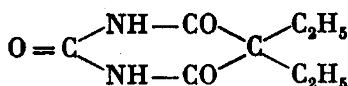
از سوی دیگر، در سال ۱۸۷۵، خواص اسید سالیسیلیک تا حدودی مشخص شده بود و آقای بایر پس از یک رشته بررسی، در سال ۱۸۹۹ با استیل سالیسیلات سود، آسپیرین را ساخت، که نخستین

1. Sertürner 2. J.B.Caventou 3. Niemann 4. Knorr 5. Kalle

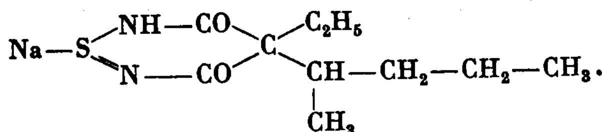
داروی خنک‌کننده‌ای بود که مستقیماً از اسید سالیسیلیک مشتق می‌شد و ردهٔ تازه‌ای از داروهای سنتزی را در جنب داروهای بلافاصله پیش از آن، مشتقات پیرازولون و مشتقات آنیلیدها، ایجاد کرد.

همهٔ این نوآوریهای شیمیدانهای آلمان، سبب شد که شیمی دارویی سریعاً جزء شیمی صنعتی شود. این نکته ناگفته نماند که در این دهه، مؤسسات بزرگ تولیدی شیمی بودند که مواد خام را برای تولیدهای دیگر خود در اختیار داشتند، و شروع به استفادهٔ صنعتی از داروهای جدید صرفاً شیمیایی کرده بودند و آنها را در سراسر جهان، پخش می‌کردند.

آغاز شیمی‌درمانی: از پایگاه این بررسی‌ها، به پهنهٔ مسایل دیگر دارویی شتافتند. ترکیب پارآلدئید در سال ۱۸۸۲ به‌عنوان داروی خواب‌آور ساخته شد. این ترکیب، بسیاری از استالدهید CH_3-CHO و از سه مولکول این جسم بسیار ساده، تشکیل شده است. آقای امیل فیشر، بیست سال بعد، سنتز نخستین‌بار بیتوریک (ورونال) را انجام داد. برای این کار یک مشتق دی‌اسید، اسید مالونیک را با اوره متراکم ساخت. ورونال با فرمول زیر:



با تعویض یکی یا هر دو گروه C_2H_5 آن با گروههای دیگر، انواعی از تبدیلات آن تولید می‌شود. این خاصیت، از همان آغاز این سده، ساخت تعداد زیادی بار بیتوریکها با خواص آرامبخش و خواب‌آور بسیار خوبی را ممکن ساخت. یکی از نوآوریهای اخیر مربوط به پایان سالهای ۴۰، به‌اصطلاح سروم راستگویی یا پنتوتال است که نمکی از سدیم یک تیوره می‌باشد:



معلوم است که در جنب بار بیتوریکها، رشتهٔ شیمی درمانی رفته‌رفته ردیفی طولانی از ترکیبات وابسته به بسیاری از گروههای دیگر شیمیایی و نیز مخلوطهای مناسبی برای تهیهٔ یک زرادخانه عظیم از داروهای شیمیایی را به‌کار گرفت، که مشتریان آن روزافزون هستند.

رده‌های بزرگ دیگر فراورده‌ها در سالهای ۳۰ تا ۴۰ این سده در سایهٔ گسترش زیست‌شیمی و میکروب‌شناسی پدید آمدند.

یکی از رده‌های بسیار پرثمر، در همان آغاز سده، پس از کارهای زیست‌شناسان متعدد و بویژه

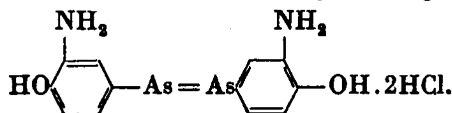
کارهای آقای پاول ارلیش[۱] و برتاین[۲] ساخته شدند. آقای ارلیش که در بیماریهای عفونی مالاریا و سیفلیس مطالعه می‌کرد درصدد به‌کار گرفتن ترکیبات شیمیایی بسیار قوی ـ اما بدون زیان برای بدن بیمار ـ برای کشتن باکتریها بود.

رشته درمان با سروم که در سال ۱۸۹۰ با تهیهٔ سروم ضددیفتری آقای امیل ادولف فون برینگ[۳] آغاز شد بیدرنگ از سوی مؤسسه آلمانی Farbwerke Hoechst مورد استقبال قرار گرفت؛ گرچه ناتوانی این رشته در درمان بیماریهایی که ناشی از باکتریهای بدون ترشح پادتن هستند، معلوم شده بود.

آقای ارلیش در آغاز، فراورده‌های رنگی را، پس از اینکه مشاهده کرد که آنها روی بعضی از بافتهای سلولی تثبیت می‌شوند، نه روی همه بافتها، مورد بررسی قرار داد. در سال ۱۸۹۱ تأثیر آبی متیلن را روی باکتری ترپونم، که مگس تسه‌تسه حامل آن است شرح داد. تحقیقات وی در همین راستا، مدت پانزده سال ادامه یافت. حدود سال ۱۹۰۶ وی مشاهده کرد که بعضی رنگ‌ها از نوع دی‌آزو، بر روی ترپونم تأثیر دارند، اما نتایج بسیار خطرناکی برای بیمار به‌بار می‌آورند. بعدها بدین نتیجه رسیدند که از این خطر کردن صرفنظر کنند. وی اندیشید که از مشتقات ارسنیکی آنیلین استفاده کند و در سال ۱۹۰۷ نخستین موفقیت را با به‌کار بردن آتوکسیل با فرمول $NH_2-C_6H_4-AsO_3HNa$ به‌دست آورد.

مشتقات ارسنیکی آروماتیک، از زمانی‌که آقای بشان در سال ۱۸۶۳ نخستین اسیدهای ارسونیک را با فعل‌وانفعال اسید ارسنیک روی آنیلینها و فنولها به‌دست‌آورد، شناخته شده بودند. این ترکیبات با جست‌وجوهای سادهٔ آزمایشگاهی، به همت آقای ارلیش به پایه‌های رشتهٔ شیمی‌درمانی و بنابراین به مبانی ساختهای نوین صنعتی تبدیل گردیدند.

آقای ارلیش و همکارش هاتا[۴] در سال ۱۹۱۰ با تهیه سالوارسان ۶۰۶، نخستین داروی مؤثر ضدسیفلیس، به یکی از بزرگترین اکتشافات در این زمینه دست یافتند. این دارو، ترکیب بسیار کمپلکسی است که در آن دو اتم ارسنیک، دو مولکول اسیدارسونیک را به یکدیگر متحد ساخته‌اند.



بدین‌ترتیب، خانوادهٔ مهمی از مشتقات، بسرعت وارد بازار شدند.

در ادامهٔ تحقیقات دانسته شد که اثر سالوارسان، قطعی نیست و بازگشت بیماری را باید در

۱. P.Ehrlich (۱۸۵۴ ـ ۱۹۱۵): میکروب‌شناس آلمانی.

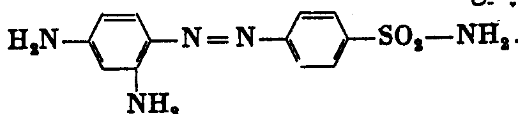
2. Berthein 3. von Behring 4. Hata

مواردی با درمان دراز مدت سرکوب کرد که در این حالت باید جیوه یا بیسموت هم به‌کار برد.

کارهای مقدماتی روی آنتی‌بیوتیکها: دارویی که لااقل مدت سی‌سال است درمان نه‌تنها بیماری سیفلیس بلکه شمار زیادی عفونتها را ممکن ساخته و خصوصیت عامل ضد عفونتهای کلی را دارد، پنی‌سیلین است که در دوران جنگ جهانی دوم به‌دست آمد.

در واقع اثر آنتی‌بیوتیکی که بوسیلهٔ *penicillium notatum* تراوش شده است، تصادفاً در سال ۱۹۲۸ مشاهده گردید و سپس آقای الکساندر فلمینگ، استاد باکتریشناسی دانشگاه لندن آن را به سنجیدگی بررسی کرد. آقای فلمینگ پس از سه یا چهار سال تحقیق توانست میکروبهایی را که پنی‌سیلین روی آنها تأثیر دارد معین کند و متوجه شد که این تأثیر سمی کاری به بدن جاندار و گلبولهای سفید ندارد. او وسایلی برای پیگیری تحقیقاتش و جداسازی این فراورده و بویژه تثبیت آن برای کاربردش در داروسازی در اختیار نداشت. در طی سالهای ۱۹۳۲ ـ ۱۹۳۹ هیچ تحقیق دیگری روی این آنتی‌بیوتیک طبیعی انجام نشد.

سولفامیدها، آنتی‌بیوتیکهای شیمیایی: بااین‌حال، در این فرجهٔ زمانی توجه شیمی‌دانان ـ زیست‌شناسان از نو معطوف اثر ضدباکتری بعضی مواد رنگی شد. این توجه پس از آن بود که آقایان: دوماک[1]، کلورر[2]، میتسش[3] توانستند از بنزن سولفامیددار، مشتق دو نیتروژنی به‌نام پرونتوزیل بسازند، که فرمول آن چنین است:



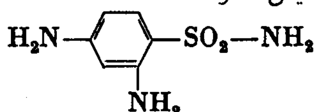
پرونتوزیل که در باکتری‌شناسی برای رنگ کردن به‌کار می‌رود تقریباً بیدرنگ خود را به‌عنوان یک عامل بسیار مؤثر سترون‌کنندهٔ باکتریها نشان داد. در همان سال پیدایشش، (۱۹۳۵) گروه انستیتو پاستور پاریس، شامل آقایان تره‌فوئل[4]، نیتی[5]، وبووه[6] برای نخستین‌بار تأثیر آن را روی تعداد زیادی از باکتریها، از آن جمله: استرپتوکک، مننگوکک پئوموکک، گونوکک به نمایش گذاردند.

بزودی ثابت شد که سولفامیدها باکتریها را از بین نمی‌برند بلکه مانع تکثیر آنها می‌شوند. مؤسسه آلمانی I.G. Farben Industrie که ساخت آنها را شروع کرده بود و کارشناسان آن، که در بین آنها کسانی بودند که سنتز پرونتوزیل را انجام داده بودند و گمان می‌بردند که به نوعی آنتی‌بیوتیک دست یافته‌اند، این داروهای تازه را در مقیاس بسیار زیادی برای فروش تبلیغ کردند. مثل سایر موارد، با دستکاریهای مختصری در فرمول، سولفامیدها دارای آثار گوناگون شدند و انواع

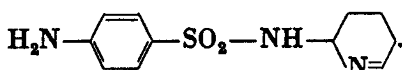
1. Domagk 2. Klorer 3. Mietzsch 4. Tréfouel 5. Nitti 6. Bovet

آنها بسرعت چنان افزایشی یافت که آزمایشگاههای همهٔ مؤسساتی در این کار فعال بودند تمامی کوششهای خود را بی‌دریغ به تحقیق در این زمینه تمرکز دادند.

از میان فراورده‌های تبلیغی که با نام تجارتی Septoplix یا 1162 F ساخت آقای ارنست فورنو بسرعت مشهور شدند، فرمول سادهٔ زیر را می‌توان به نمایش گذارد:



این ترکیب پارا آمینوبنزن سولفامید، فراوردهٔ تجزیهٔ پرونتوزیل در موجود زنده (*in vivo*) هم می‌باشد؛ با جانشین کردن یک حلقهٔ پیریدین به‌جای یک اتم هیدروژن، ترکیب داژنان Dagénan از آن مشتق می‌شود:



تولید سولفامیدها طی چند سال در کشورهای تولیدکنندهٔ آن به میلیونها تن رسید.

تجویز انبوه سولفامیدها در موقعیتهای بسیار متفاوت به‌شکل استعمال داخلی یا خارجی، موجب شد که سریعاً باکتریهای مورد نظر پاسخ دهند. اثر آنتی‌بیوتیکی سولفامیدها نتیجهٔ این واقعیت است که در محیط رشد باکتریها، سولفامید جانشین ترکیبی می‌شود که ساخت نسبتاً مشابهی با آن دارد، یعنی اسید پارا آمینوبنزوییک $CO_2H-C_6H_4-NH_2$ که در حقیقت ویتامین H رشد موجودات ذره‌بینی است. پاسخ این موجودات، لااقل برای بعضی از آنها، طی نسلها، سازگاری با شرایط جدیدی است که به آنها تحمیل شده است؛ یعنی تبدیل شدن به نژادهای مقاوم در برابر سولفامیدها.

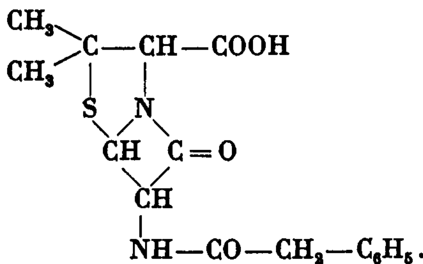
جداسازی آنتی‌بیوتیکهای طبیعی ...: شیمی‌درمانی ناگزیر از یافتن سلاح تازه‌ای بود، بدین جهت، نخست در انگلستان، بعداً در سالهای ۱۹۴۱ تا ۱۹۴۳ در ممالک متحدهٔ امریکا، گروههای پژوهشی، به ریاست سر هاوارد فلوری[1] در آکسفورد، گروه آزمایشگاه فدرال تحقیقات کشاورزی در پیوریا[2] (ایلینویز)، مطالعه روی پنی‌سیلین را آغاز کردند. آقای فلوری، چین[3] و همکاران آنها در سالهای ۱۹۳۹ ـ ۱۹۴۱ پنی‌سیلین را به‌صورت خالص به‌دست آوردند و وسیله نگاهداری آن را یافتند و بررسی‌های کلینیکی روی آن را شدت دادند. اما در زمان جنگ، منابع بریتانیای کبیر برای، ایجاد روشهای تولید صنعتی آن در مقیاس فراتر از تولید طبیعی این ماده، کافی نبودند. سابقهٔ تهیهٔ آنزیمها اولیه در مقیاس صنعتی، بزحمت به بیست سال می‌رسید و سابقهٔ ویتامینها و هورمونها از

1. H.Florey 2. Peoria 3. Chain

این هم کمتر بود. پیش‌بینی می‌شد که مقدار کاربرد آنها در آینده بسیار کمتر از آنتی‌بیوتیکها طبیعی باشد. در سال ۱۹۴۱ فلوری محافل علمی و صنعتی امریکا را بر آن داشت که گسترش آن را شروع کنند. آنتی‌بیوتیکها در این مرحله از تحقیقات، به‌عنوان یک فراورده جنگی با اهمیتی برابر الیاف جدید و مواد سنتزی (که صنعت آنها را دیگر تهیه می‌کرد)، انرژی هسته‌ای یا کامپیوترها (که تازه شناخته شده بودند) تلقی می‌شدند.

بحث بر سر گسترش آنها در تجهیزات صنعتی با ابعاد بزرگ، کشت نوعی قارچ، یافتن روشهایی برای خلوص قابل قبول، سپس تبدیل و تکمیل آنها در محیطی کاملاً دور از عفونت، برای حفظ خلوص فراورده‌های نهایی بود. این وظیفه طی دو سال بوسیلهٔ مؤسسات امریکایی در سایهٔ قدرت صنعتی آنها که کوششهای زمان جنگ پشتیبان آن بود، انجام گرفت. چنانچه شرایط زمان جنگ وجود نداشت، چنین کاری بی‌تردید یک یا چند دهه زمان می‌گرفت.

... و سنتز آنها: فرمول پنی‌سیلین از نقطه نظر شیمی، لااقل به‌طور تقریبی، معلوم شد، سپس فرمول دقیق آن را تعیین کردند:

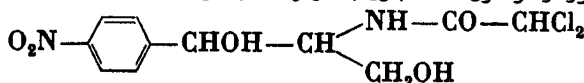


در واقع در روی این نمایه، فرمول پنی‌سیلینهای گوناگونی یافت شده است که تفاوت آنها به بنیانهای ثابت شده روی گروه $-\mathrm{CO}-\mathrm{NH}-$ برمی‌گردد. بنزیل پنی‌سیلین، که در بالا آورده شده است، تنها پنی‌سیلینی است که در درمان به‌کار می‌رود.

سنتز پنی‌سیلین در سال ۱۹۴۴ عملی شد. فرمول آنتی‌بیوتیکهای دیگر جدا شده، در همان زمان یا کمی بعد، باکتریهای گوناگون، جلبکها یا قارچها بیدرنگ مشخص شدند: برای تیروتریسین که از *bacillus brevis* استخراج می‌شود از استرپتومایسین آکتینومایستها و غیره. آنها کم و بیش کمپلکس بوده و همواره با هم یا با خانواده‌های بزرگ تفاوت زیاد دارند. در واقع با وجود موفقیت در سنتز شمار فراوانی از آنها، آنتی‌بیوتیک پایه، تقریباً همیشه از یک موجود زنده طبیعی به‌دست آمده است و با طی بیست سالی، شیمی‌دانها یاد گرفتند که چگونه روی عاملهای گوناگون شیمیایی مولکولهای آن، برای گسترش ردیف داروهای تولیدی خود دخل و تصرف کنند.

کلرومایستین، که علیه تیفوس داروی مؤثری است از آنتی‌بیوتیکهایی است که حدود ۲۰ سال

پیش (حدود سال ۱۹۵۸) ساخته شده است. مراحل اجرای این سنتز، نمایش بسیار جالبی از مهارتهایی است که کارشناسان شیمی آلی، واکنشهای بنیادینی را که در بیش از یک سده پیش کشف شده بودند برای عبور از مولکول سادهٔ بنزن به فرمول زیر، مورد استفاده قرار دادند:



در این مورد ده عمل پیاپی انجام می‌گیرد که از واکنش فریدل و کرافتس آغاز می‌شود و به برومدار کردن، نیتروژندار کردن، و به دنبال آنها استیلدار کردن، احیا، هیدرولیز و غیره می‌کشد. در این عملیات دیگر اثری از تهیهٔ گاه‌گاهی یک ترکیب شیمیایی جهت رفع نیاز آزمایشگاه نیست، بلکه تولید منظم دارو مورد نظر است. بدین‌ترتیب، می‌توان تصور کرد که تکنیک شیمی صنعتی، از نظر کیفیی و کمی، از زمان پیدایش نخستین رنگ‌های صنعتی در سالهای ۱۸۵۰ تا ۱۸۶۰ تا چه اندازه به پیش رفته است.

باید در نظر گرفت که صنعت داروسازی در سال ۱۸۹۰ با دشواری تازه‌ای برخورد کرد که به خلوص و فسادناپذیری فراورده‌های آن و همچنین شرایط پخش بازرگانی آنها مربوط می‌شد: این دشواریها تنها با نزدیکی و تمرکز وسایلی برطرف می‌شدند که صنعت شیمی از تکنیکهای دیگر، با همین خلاقیت و تحول سریع اقتباس کرده بود.

تواناییها و ناتوانیهای شیمی باکتریشناسی: همان‌طور که در مورد سولفامیدها گفته شد، چنین می‌نماید که به نسبتی که بدن انسان در اثر تجویزهای مکرر این داروها، به آن آغشته می‌شود، توان حمایتی این داروها کاهش می‌یابد. استعداد باکتریها در تطبیق خود با عواملی که تکثیر آنها را بشدت متوقف می‌سازند سبب کشف پدیده‌ای شد که تا آن زمان شناخته یا لااقل تا این اندازه قطعی نبود. وانگهی این تنها بن‌بست (پارادوکس) کار شیمیدانها، که در همهٔ زمینه‌ها به تولید صنعتی روی آورده بودند، نبود. ما از فراورده‌های احتمالی باقیماندهٔ صنعت نفت برای کشت مواد نیتروژندار مصرفی سخن نخواهیم گفت. این کشت ظاهراً زمانی به سودآوری تجارتی خواهد انجامید؛ اما این زمانی است که توده‌های مردم را کمی مواد خوراکی منابع سنتی کشاورزی و دامپروری تهدید کند. با این وجود، نویسندگان داستانهای علمی و استنتاجات اشخاص بدبین، هنوز بدان نپرداخته‌اند و چند برداشت پروتیدهای باکتری ـ نفتی تا به امروز تنها به‌عنوان مکمل خوراک دام به‌کار رفته‌اند.

بااین‌حال، فراورده‌های صنایع بزرگ و کنونی شیمی به تکثیر برخی ناراحتیها و خطرات برای انسان انجامیده‌اند.

میزهٔ حیوانات شکارچی، دود، گاز، آبها ردیف نخست این فهرست را اشغال کرده‌اند، اما این

پدیدهٔ تازه‌ای نیست. کاربرد زغال‌سنگ برای گرم کردن خانه‌ها در سدهٔ هجدهم در لندن ممنوع اعلام شد. بعداً فزونی یافتن منابع فضولات، خرابیها را تشدید کرد، و با قوانینی کوشیدند تا آثار آن را محدود سازند؛ اما قانون همیشه پشتیبان منابع خصوصی یا پشت سر دولت بوده است.

خسارتهای ناشی از افزایش آخالهای غیرمخرب، نظیر بسته‌بندیهای پلاستیکی جدید، که کمی بعد، تاریخ آن بررسی خواهد شد از نوع دیگر هستند. زیست‌شیمی، جست‌وجو برای یافتن باکتریهایی راکه می‌توانند نابودی آنها را هماهنگ با تجمع آنها تأمین کنند شروع کرده است. سرانجام، خطرات ناشی از پایداری شگفت‌انگیز باکتریها دربرابر د.د.ت. افکار را بشدت پریشان کرده است.

فراورده‌های ضدانگل: قارهٔ اروپا پیدایش این مادهٔ جدید ضدانگل راکه ساختهٔ اسلحهٔ متفقین در پایان جنگ جهانی دوم است به‌یاد دارد. افکار عمومی متقاعد شده بود که با پنی‌سیلین و د.د.ت. بشریت از این پس، سلاحهایی اختیار دارد که وی را از همهٔ آفتهای جانداری که از همان آغاز پیدایش با آنها دست به گریبان بود، ایمن می‌دارد. اگر صددرصد چنین نبود هم باز ترکیب د.د.ت. به‌عنوان مهمترین پژوهش در شیمی انگل مورد توجه قرار می‌گرفت.

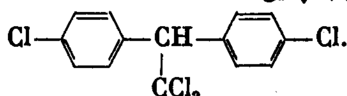
کاربرد فراورده‌های شیمیایی، از جمله ارسنیک یا گوگرد، به‌عنوان حشره‌کش، از زمان باستان رواج داشته است. عصاره‌های گوناگون گیاهی، آب تنباکو، گوگرد بابونهٔ گاوی درگذشته در بعضی از نواحی و بعدها در اوایل سدهٔ بیستم، زمانی‌که ساخت سولفات نیکوتین در امریکا شروع شد در مقیاس جهانی بااهمیت روزافزونی به‌کار گرفته می‌شد. چند بحران کشاورزی، از قبیل بحران مربوط به شیوع حشرهٔ آفت سیب‌زمینی در سال ۱۸۶۷ در ممالک متحدهٔ امریکا یا بحران مربوط به شتهٔ مو در تاکستانهای فرانسه، تولید و فروش فراورده‌های ارسنیکی و سولفورکربن را افزایش داد. سولفات مس مخلوط با آهک به اسم جوشاندهٔ بوردو به‌عنوان قارچ‌کش به‌کار می‌رفت. حدود ۱۹۳۰ تعویض جوشانده بوردو با اکسی کلورید مس شروع شد. اما مثل همیشه، ترکیبات جدید از بین برندهٔ حشرات و قارچ، سمهای پیشین را تا سالهای ۱۹۳۰، که فراورده‌های سنتزی وارد بازار شدند، بکلی از میدان بیرون نکرده بودند.

از آنجا که هم بدلیل پیشرفت کشاورزی و هم به‌علت افزایش ظرفیتهای حمل و ذخیره‌سازی، نیاز به مبارزه با انگلها بسیار زیاد شده بود، صنایع شیمی، طی نیم سده یکی از شاخه‌های مهم خود را که اصولاً درکار تهیه کانیها و در مقیاس کوچکتری به استخراج مواد طبیعی بود با سرعت زیاد گسترش داد.

در سال ۱۹۳۲ زمانی‌که قدرت ضدانگلی بعضی ترکیبات آلی سنتزی شناخته شدند، این

صنعت بکلی چهرهٔ دیگری یافت. مؤسسات بزرگ تولیدکننده رنگهای سنتزی نظیر هوخست در آلمان و شرکت ی. ر. گایگی[1] در سویس مؤسساتی بودند که پیش از دیگران به نتیجه رسیدند. نخستین ترکیبی که در آلمان ساخته شد یا به گروه کربازول ـ ترکیب نیتروژنداری که در بعضی از اجزای قطرانهای زغال‌سنگ یافت می‌شود ـ تعلق داشت یا به گروه دی‌آزوها، که مشتقات پیرولیدین یا پیپریدین بودند. تنها آزمایشگاه پژوهشی یک مؤسسه صنعتی بزرگ می‌توانست دارای افراد و وسایل فنی لازم برای دستکاری این ترکیبات پایه‌ای باشد و روشهای ساخت عملی را راه‌اندازی کند.

د.د.ت.: افتخار کشف این ماده یا قدرت انگل‌زدایی آن به آقای پاول مولر، در سال ۱۸۳۹ برمی‌گردد که در ردیف کارهای مؤسسه گایگی که بویژه در پی‌یافتن انگل‌زدای بسیار قویتر از مواد موجود بود، از موفقیتهای بزرگ است. مشتقات هالوژندار بنزن به‌طورکلی از نظر قدرت ضدانگلی آنها بخوبی شناخته شده بودند. در آن زمان از ترکیب پارا دی‌کلروبنزن در حشره‌کشی استفاده می‌شد، اما تأثیر آن زودگذر بود. آقای مولر پس از تهیهٔ دی‌فنیل‌تری‌کلراتان و دیگر مشتقات بنیان فنیل دست به‌کار تراکم کلروبنزن با ترکیب کلرال (استالدهید سه کلردار) به کمک یک عامل قوی آبزدای شد و ترکیبی به‌دست آورد که فرمول آن تفاوت چندانی با یکی از اولین فراورده‌های آن نداشت. این ترکیب همانا دی‌کلرودی‌فنیل‌تری‌کلراتان بود که قدرت حشره‌کشی آن از همهٔ اجسام مورد بررسی تا آن زمان، بسیار بیشتر بود. فرمول این ترکیب چنین است:

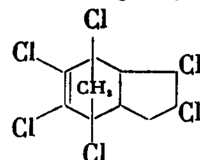


این ترکیب به‌نام د.د.ت. و بعدها بانام néocide و اسامی دیگری به بازار آمد د.د.ت. را در سال ۱۹۴۱ گایگی به ثبت رسانید و در سال بعد اجازهٔ ساخت آن به انگلستان داده شد و مؤسسات آنگلوساکسون بی‌درنگ به ساخت آن به‌مقدار زیاد دست زدند تا بتوانند به نیازهای فراوان به حشره‌کشها، که حالت جنگ به‌وجود آورده بود، پاسخ دهند.

این موفقیت بزرگ سبب توقف این تحقیق نشد. مشتقات هالوژندار دیگری از دی‌فنیل نیز در ردیف د.د.ت. جای گرفتند. طی سالهای جنگ هم ترکیباتی متعلق به گروههای دیگر شیمیایی بررسی شدند. در فرانسه، آقای دوپیر[2] در سال ۱۹۴۱، و در انگلستان اسلید[3] در ۱۹۴۲ هریک جداگانه روی ترکیب سیکلوهگزان کارهایی را شروع کردند که به تهیهٔ مشتق شش کلری از آن به‌نام لیندان lindane یا گامگزان gammexan انجامید. که پس از پایان جنگ، تقریباً در همان زمانی‌که خانواده‌های انگل‌زدای بزرگ دیگر، نخست در امریکا و سپس در آلمان معرفی شدند، به بازار آمد.

1. J.R.Geigy 2. Dupire 3. Slade

یکی از این خانواده‌ها از استرهای فسفری تشکیل شده است که گروههای آلکیل آن می‌توانند تغییر یابند و به دستور بایر بوسیلهٔ شرادر[1] شیمیدان آلمانی مورد مطالعه قرارگرفت. خانوادهٔ دیگری که دارای کلران chlorane بود و ردیفی از ترکیباتی از این نوع، یعنی مشتقات کلردار دی‌سیلکوپنتادی‌ان



در سالهای ۱۹۴۵ و ۱۹۵۰ به توسط رینشنایدر[2] شیمیدان آلمانی و هایمن[3] در ممالک متحدهٔ امریکا مورد بررسی قرار گرفتند. به‌علت کمی وسایل، که آلمان در سالهای بلافاصله پس از جنگ از آن رنج می‌برد، امریکاییها بسرعت بازار را تصاحب کردند.

همهٔ این تحقیقات و نیز آنهایی که بعداً انجام گرفتند به تولید انواع فراورده‌های انگل‌زدایی با ویژگی مطلوب و مورد جست‌وجو در آزمایشگاه انجامید و بسط تازه‌ای به شاخه‌ای از شیمی صنعتی داده شد و مرزهای آن از محدودهٔ مبارزه با انواع انگلها به هر آنچه که انسان به نابود کردن آن علاقه‌مند است گسترش یافت. همان‌طورکه معلوم است این عمل تدافعی برای خود انسان هم، گاهی خطر داشته است، اما احتمالاً این فکر هم درکار بوده است که صنعت شیمی به آنجا خواهد رسید که اقدامات تدافعی لازم را بیابد. وانگهی، چنین می‌نماید که هراسی که از سخت جانی ماهیت این انگل‌زداهای سنتزی تا کنون تصور شده است توجیهی ندارد.

کشف ویتامینها: پژوهشهای مربوط به شیمی فیزلوژی و زیست‌شیمی، در سالهای ۱۹۳۰ منجر به تهیهٔ صنعتی عصاره‌های طبیعی شد، و بعداً بخش بزرگی از ساخت بعضی از این فراورده‌های سنتزی متعلق به دو گروه بسیار متباین ویتامینها و هورمونها را در بر گرفت.

کشف ویتامینها پیش ازکشف هورمونها بود. آقای کازیمیر فونک[4] فیزیولوژیست لهستانی‌الاصل در سال ۱۹۱۲ اصطلاح ویتامین را برای معرفی مادهٔ ضدبیماری بری‌بری و ضدالتهاب اعصاب، موجود در شلتوک برنج پیشنهاد کرد. از زمان کارهای کریستیان آیکمان پزشک هلندی در ۱۸۸۹ به‌وجود آن پی‌برده بودند. این عامل زیستی را بعداً ویتامین B_1 یا آنورین نامیدند. در همین سال ۱۹۱۲، آقای فونک، عامل ضد(اسکوربوت) را که از سال ۱۹۰۷ در غذاهای تازه، سبزیها و میوه‌ها دنبال می‌کردند، یافت، که ویتامین C بود.

بدین‌ترتیب، در دورهٔ پیش از جنگ جهانی اول و غالباً درپی مشاهدات کلینیکی مربوط به پنجاه سال پیش، دانشمندان فیزیولوژی معتقد شده بودند که شماری از بیماریهایی کشنده و بعضی ناتوانیهای عضوی، برخاسته از این بد غذایی‌هایست. همچنین این دوره‌ای بود که شناسایی

1. Schrader 2. Rinschneider 3. Hyman 4. Casimir Funk

نخستین کاتالیزورهای زیستی که در بیشتر تبدیلهای شیمیایی، که در اعضای زنده انجام می‌گیرند، مؤثرند آغاز شده بود. همهٔ این کاتالیزورها را آنزیم، دیاستاز وگاهی مخمرهای محلول نامیدند. در کار آنها، نوعی شباهت با واکنشهای تخمیر وجود دارد از قبیل تخمیرهای الکلی و استیکی که طی سده‌هایی به‌طور صنعتی انجام می‌گرفتند. آقای بوشنر در سال ۱۸۹۷ نشان داد که مخمر آبجو در سلولهای خود، مبنای کارش، نوعی تخمیر الکلی است و بدین‌ترتیب، ثابت کرد که آن مخمر، تحت تأثیر یک دیاستاز و نه از عامل حیاتی این مخمر، کار خود را انجام می‌دهد. تولیدهای صنعتی بر این مبنا قرار گرفتند.

مجموعهٔ این مشاهدات، پژوهش‌گران را برانگیخت تا ماهیت شیمیایی این عوامل را تعیین کنند. در مورد ویتامینها، که نحوهٔ عمل آنها روی تعادل زیستی فرد زنده، انسان یا حیوان، گویا بسیار دقیقتر است و هنوز کاملاً شناخته شده نیست، در سال ۱۹۱۵، این مفهوم ثابت شد که شماری از عوامل، محلول در چربی هستند، نظیر ویتامین A، عامل رشدی که بوسیلهٔ دو گروه پژوهش‌گر در سال ۱۹۱۵، آیزبورن[1] و مندل از یکسوی، مک کولم[2] و دیویس از سوی دیگر، شناخته شد و عوامل محلول در آب از قبیل ویتامین B_1، ضدبربری و ضدالتهاب اعصاب، که همین پژوهش‌گران در سال ۱۹۱۴ و ۱۹۱۵ به آن نزدیک شده بودند؛ و ویتامین C، ضدآسکوربوت فونک، که آقای کاولند هاپکینز[3] نیز آن را بررسی کرده بود.

اهمیت زیستی و دارویی ویتامینهای گروه نخست، بخوبی ارزیابی شدند، اما جنگ جهانی گویا کارهای مربوط به آنها را متوقف ساخت. این تحقیقات با آغاز سالهای ۱۹۲۰ دنبال شد. آقای ملانبی[4] در ۱۹۱۹ گمان می‌برد که باید عامل ضد راشیتیسم را با ویتامین A یکی دانست. کمی بعد آن را با نام ویتامین D متعلق به خانواده‌ای از ترکیبات شیمیایی، استرولها، تشخیص دادند و حدود بیست سال بعد، ویتامینهای D همچون نوعی عاملهای زیست‌شیمیایی بااهمیت فیزیولوژیکی بسیار زیاد شناخته شدند.

ماهیت شیمیایی و سنتز ویتامینها: در این زمان می‌دانستند که ویتامینها اجسامی بسیار متفاوت از یکدیگر هستند و تنها رده‌بندی ممکن برای آنها حلالیت در آب و در چربیها می‌باشد. آقایان لوسی راندوان[5] و هانری سیمونه در سالهای ۱۹۲۲ ـ ۱۹۲۳ این مفهوم را پیش کشیدند. که ویتامین B تشکیل کمپلکسی از ترکیبات نیتروژنی می‌دهد که ویتامین P (که بعدها، PP شد) جزئی از آن است. آقایان گلدبرگ و تانز[6] در ۱۹۲۵ متوجه شدند که ویتامین PP ضدبیماری پلاگر است.

1. Osborne 2. McCollum 3. Cowland Hopkins 4. Mellanby 5. Luci Randoin
6. Tanner

شناسایی ویتامینها و تهیهٔ آنها به‌شکل خالص از نظر شیمیایی، بی‌درنگ در فاصلهٔ میان دو جنگ پیگیری شدند. در سالهای ۱۹۲۲ ـ ۱۹۲۵ آقایان زوره[1] و اونز ویتامین E را که ویتامینی ضدسترونی و محلول در چربی است شناسانیدند، و آقای کارر[2] سویسی در سال ۱۹۳۸ برای سنتز آن روشی به‌دست داد.

آقای سنتاگیورکی[3] مجارستانی در سال ۱۹۲۸ توانست برای نخستین‌بار از قشر غدهٔ فوق‌کلیوی، ویتامین C فونک را به‌شکل خالص به‌دست آورد و متوجه شد که یک ترکیب نسبتاً سادهٔ اسید آسکوربیک است. پس از تهیهٔ صنعتی آن، بیدرنگ با نام ویتامین C، مصرف فراوان یافت و چند سال بعد، در سال ۱۹۳۴ که آقای رایششتاین[4] سویسی، سنتز آن را عملی کرد، مزایای آن به اثبات رسید. ویتامین A که فرمول آن در ۱۹۲۹ به توسط آقایان کولیسن[5] و مور شناخته شد، از همان آغاز مصرف، مقام مهمی به‌دست آورد. فرمول آن به فرمول کاروتن، که پیش ویتامین آن تلقی می‌شود بسیار نزدیک است. عمل آوردن روغن جگر ماهی در آغاز، پایهٔ ساخت آن شد و در ممالک متحدهٔ امریکا گسترش خاصی یافت. بعدها در ۱۹۴۶ سنتز آن و کاروتن در سویس عملی شد.

تعیین ساختار شیمیایی ترکیبات نیتروژنی، که گروه ویتامینهای B را تشکیل می‌دهند، پس از کارهای راندوان و سیمونه، سرعت گرفت. پس از آنکه آقایان ویلیام و وینت‌هاوز ساختار شیمیایی آنورین، ویتامین $B_۱$، را معین کردند آقایان آندرساگ[6] و وستفال در آلمان سنتز آن را عملی کردند (۱۹۳۶). ترکیب لاکتوفلاوین، ویتامین $B_۲$ را که آقای واربورک[7] مشخص ساخته بود گروه آقای ر. کون[8] در ۱۹۳۳ به‌شکل خالص به‌دست آورد و سنتز آن چند سال بعد انجام گرفت. ویتامین $B_۶$، آدرمین، همچنین سرگذشتی دارد و در سال ۱۹۳۹ به سنتز آن، در آلمان و امریکا، توفیق یافتند.

در همین خانواده، از نقطه‌نظر زیستی اگر نه از جنبهٔ شیمیایی، ویتامین PP را آقای الونهین[9] در ۱۹۳۷ به‌طور خالص به‌دست آورد و معلوم شد که آمید اسید نیکوتینیک است. آن هم از راه سنتز ساخته شد و حیطهٔ درمانی آن بسیار فراتر از درمان پلاگر است. یک ویتامین P با تراوایی مویینگی، بعدها در حالت خلوص به‌دست آمد و آقای لاووله[10] در فرانسه فرمول شیمیایی آن را به‌دست داد که اپی‌کاتشین épicatéchine است؛ ترکیبی بدون نیتروژن و کاملاً متمایز از ویتامین PP. آن را هم با سنتز تهیه کردند.

ردیف ویتامینهای B اخیراً بسیار طویل شده است. ویتامین $B_۶$ را معمولاً اسید فولیک می‌نامید

1. Sure 2. Karrer 3. Szenta Györgyi 4. Reichstein 5. Collison 6. Andersag
7. Warburg 8. R.Kuhn 9. Elvenhjen 10. Lavollay

زیرا آن را در سال ۱۹۴۷ اساساً از برگهای سبز به‌دست می‌آوردند، اما از جگر و از مخمر آب‌جو هم تهیه می‌شود. سنتز آن هم عملی شده است و در درمان کم‌خونی تأثیر دارد. در سال بعد، ویتامین B_{12} به‌مقدار بسیار کم، با عمل آوردن مقدار زیادی جگر حیوانات به توسط گروه اسمیت در انگلستان و گروه ریکه[1] در ممالک متحدهٔ امریکا به‌دست آمد. در این‌جا، خود را در برابر ترکیب کمپلکسی از کبالت یافتند که علیه کم‌خونی مزمن، که تا آن زمان یک بیماری کشنده بود، تأثیر داشت. تهیهٔ صنعتی آن به‌عنوان فراوردهٔ جانبی استرپتومایسین بود، زیرا که از بعضی باکتریها به‌دست‌می‌آید.

شمار زیاد دیگری از عوامل ویتامینی، معرفی شدند، که خالص و نیز از راه سنتز به‌دست آمدند، مثلاً ویتامینهای K یا ویتامینهای H و F و ... از حدود سالهای ۳۰ زیست‌شیمی صنعتی در قسمت تولید و فروش فراورده‌های ویتامینی پیشرفت زیادی داشت. بیشترین تعداد آنها از راه شیمیایی تهیه می‌شوند که جانشین همه یا بخشی از ویتامینهای دارای منشأ مواد خام طبیعی، گیاهی یا جانوری شدند. اما روشهای شیمیایی ـ زیستی نیز کنار گذاشته نشده‌اند. ویتامین D، یا به‌عبارت درست‌تر، ویتامینهای D، هنوز از روغن جگر ماهی، یا با در زیر اشعه قرار دادن پیش ویتامین آن به‌دست می‌آید. شیر را نیز برای اینکه مقدار ویتامین D آن زیاد شود تحت تأثیر اشعه می‌دهند.

بدین‌ترتیب، بر اثر تحقیقاتی که صرفاً هدف پزشکی داشته‌اند و دانشمندان فیزیولوژی آن را دنبال کرده و شیمیدانها آن را توسعه داده‌اند، فعالیت صنعتی بزرگی ایجاد شد که هم‌چنان روی به‌پیش و گوناگونی دارد.

شناخت هورمونها: دربارهٔ یکی از آخرین رشته‌هایی که در صنعت زیست‌شیمی پدید آمد، هورمونها، همین سخنان را می‌توان گفت. نخستین آشنایی با این مواد در اواخر سدهٔ گذشته بود، زمانی‌که فیزیولوژی به تازگی آشکار ساخته بود که بعضی از غده‌های درونریز، یا حتی بخشهایی از این غده‌ها، تعدادی عوامل شیمیایی با مقادیر بسیار کم در ارگانیسم ترشح می‌کنند که روی وظایف حیاتی تأثیر ویژه‌ای دارند. اصطلاح رایج برای باز نمودن پدیدهٔ اثر هورمونها، همانا پیام‌آوران شیمیایی است. عامل ترشح شده، از یک غده یا بخش کاملاً مشخصی از آن، در خون ریخته می‌شود و از فاصله‌ای اجرای وظایف اعضای دیگر یا غده‌ها را در شرایط مشخصی که مناسب کار آنهاست، تنظیم می‌کند.

در بعضی از درمانهای پزشکی تجربی از مدتها پیش، وجود این عوامل مورد قبول قرار گرفته بودند. تحقیقات دراین‌باره، از سال ۱۸۹۰ با بررسی ترشح هیپوفیز یا روابط بین کم‌کاری بعضی از غده‌ها، مانند تیروئید یا لوزالمعده و بعضی بیماریها آغاز شد. در کمتر از پانزده سال، نخستین

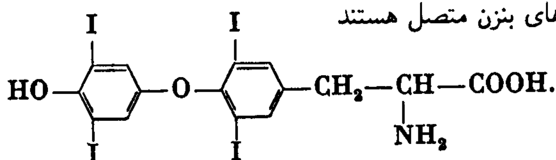
1. Ricke

هورمون را با روش شیمیایی تولید کردند.

دو پژوهش‌گر با نامهای آلدریچ[1] از یکسوی و تاکامینه[2] از سوی دیگر، آدرنالین ترشح شده از بخشهای نرم غده‌های فوق‌کلیوی را خالص به‌دست آوردند؛ اثر آن روی کار اعضا، چندین نوع بود: انقباض رگهای مویین خون، تنظیم مقدار قند خون و متابولیسم بازال[3]. آقای ف. اشتولسه در سال ۱۹۰۴ در آزمایشگاههای Farbwerke Hoechst، کارخانهٔ رنگ‌سازی و فراورده‌های شیمیایی، فرمول شیمیایی آن را یافت که نسبتاً ساده بود و روش ساخت سنتزی آن را برپایهٔ فراورده‌های بسیار رایج دی‌کلروبنزن (اورتو)، که دی‌فنول مربوطه را تهیه می‌کند، متیل‌آمین و یک مشتق کلردار اسید استیک، کلرور کلراستیل، که طی چند مرحله از استیلن به‌دست می‌آید، معلوم کرد.

دو هورمون دیگر غده‌ای مشخص شدند و در طی پانزده سال، به‌طور خالص به‌دست آمدند. اما ساخت صنعتی آنها بسیار دشوار بود.

اولی را آقای کندال با کارهای مدید از ۱۹۱۳ تا ۱۹۱۹ از تیروئید (غده درقی) استخراج کرد، و در پایان این مدت، در شکل یک فراوردهٔ متبلور بسیار فعال آن را به‌دست آورد. این، همان تیروکسین است که آقایان هارینگتون و بارجر[4] فرمول آن را باید تعیین کرده و نشان داده باشند که این ترکیب، ۶۳٪ ید دارد که به حلقه‌های بنزن متصل هستند



همین نویسندگان به سنتز این اجسام نیز توفیق یافتند. در نتیجه می‌بایست پذیرفت که چندین هورمون تیروئید وجود دارد که جملگی از راه سنتز ساخته می‌شوند. در پزشکی، عوامل تازه تنظیم‌کنندهٔ متابولیسم بازال در دسترس قرار گرفته بودند.

هورمونی که به توسط گروهی از سلولهای لوزالمعده، جزایر لانگرهانس، ترشح می‌شود کار دانشمندان فیزیولوژی و پس از آنها، شیمیدانها را دشوارتر کرد. در سال ۱۸۸۹، یعنی در آغاز پژوهشهای پزشکی در این زمینه، آقایان فون مهرینگ[5] و مینکوفسکی متوجه تأثیر فراوردهٔ ترشح این سلولها در متابولیسم قند ـ که بی‌نظمی آن ایجاد دیابت قندی می‌کند ـ شدند. اما استخراج عامل فعال در این مورد، تا مدتها امکان‌ناپذیر می‌نمود. آقای فردریک گ. بنتینگ[6]، پزشک کانادایی، که

1. Aldrich 2. Takamine

۳. مجموع فعالیتهای فراساختی (آنابولیکی) و فروساختی (کاتابولیکی) یک موجود زندهٔ در حالت استراحت، برای تأمین انرژی لازم جهت اعمال حیاتی. ـ م

4. Barger 5. von Mehring 6. F.G.Banting

آقای بست[1] دانشمند فیزیولوژی، در بخشی از کارها یار او بود سالهای ۱۹۲۰ ـ ۱۹۲۱ را وقف این تحقیق کرد و در آغاز ۱۹۲۲ نخستین موفقیتها را به‌دست آورد.

کارایی انسولین به‌عنوان داروی دیابتها از نو انگیزهٔ پژوهشهایی، از یکسو برای روبه‌راه کردن روشی جهت استخراج زیاد، و از سوی دیگر برای تعیین ترکیب آن و کوشش در انجام سنتز آن شد. ساخت خالص و متبلور آن به کمک غده‌های حیوانات، پس از پژوهشهای فراوان گروههای متعدد پژوهشگر و آزمایشگاههای صنعتی امریکای شمالی در طول جنگ جهانی دوم عملی شد.

شیمیدانها بزودی دانستند که در برابر یک ترکیب پروتئیدی بسیار پیچیده قرار دارند. پس از اینکه آن را به مقادیر فراوان و در حالت متبلور و دارای خلوص زیاد تهیه کردند، ترکیب شیمیایی آن هم تدریجاً روشن شد. در شروع سالهای ۵۰ آقای زنگرفرمول کامل انسولین را که وزن مولکولی آن حدود ۶۰۰۰ است تعیین کرد. این مولکول غول‌پیکر، دو زنجیر پپتیدی دارد که با پلهای گوگردی به‌یکدیگر متصل هستند، هریک کمتر از شانزده گروه نسبتاً ساده، از آن جمله اسید گلوتامیک، سیستین، تیرازین، والین، لوسین و غیره ندارند. کمپلکس بودن مولکول، سنتز آن را بسیار دشوار می‌کند. باید گفت که انسولین و نیز هورمونهای متعدد هیپوفیز، از جمله فراورده‌های زیست‌شیمیایی استخراجی از مواد طبیعی به‌شمار می‌آیند.

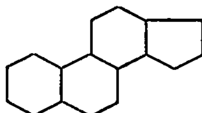
هورمونهای جنسی: رشتهٔ غدد درونریز که در آغاز سدهٔ بیستم شروع خوبی داشت، در سالهای ۱۹۳۰ با کشف هورمونهای جنسی و سپس غدهٔ کوچک هیپوفیز یا نخاعی در زیر مغز، که نه‌تنها بر ترشحات هورمونهای جنسی، بلکه روی شماری از ترشحات دیگر نیز فرمان می‌راند، سراپا دگرگون شد.

بررسی کارهای تولید مثل، طی سالهای ۱۹۲۰ به کشف این موضوع انجامید که تعدادی بافتهای بیضه و تخمدان رفتاری همچون غده‌های درونریز دارند و هورمونهایی با تأثیر فیزیولوژیکی خاص ترشح می‌کنند. کمی بعد توجه یافتند. که چنین خصوصیتی آنچنان هم که در آغاز گمان می‌رفت محدود نیست.

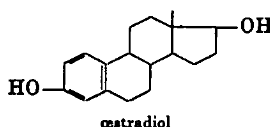
آقای ادوارد ادلبرت دویزی[2] در امریکا و آقای آدولف بوتنانت[3] در آلمان توانستند نخستین هورمونهای جنسی ـ بویژه فولیکولین یا اُسترون oestrone میزهٔ زنهای آبستن ـ را در سال ۱۹۲۹، متبلور و خالص به‌دست آورند. ساخت صنعتی آنها از میزهٔ مادیانهایی که برای این کار، آنها را آبستن می‌کنند و توسط مؤسسات بزرگ فراورده‌های زیست‌شیمیایی نگاهداری می‌شوند بزودی آغاز شد. یکی دو سال بعد آقایان وینت‌هاوزن و هاینریش ویلانت[4]، شیمیدانهای آلمان نشان دادند که فرمول اساسی همهٔ هورمونهای جنسی، مشابه استروئیدهایی است که در آن زمان در کلسترول

1. Best 2. E.A.Doisy 3. A.Butenandt 4. H.Wieland

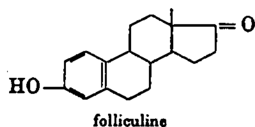
زنگ چاودار و در ویتامین D با آن برخورد کرده بودند. ساختار پایهٔ این خانواده، سه حلقهٔ با شش اتم کربن و یک حلقهٔ پنج اتمی دارد.



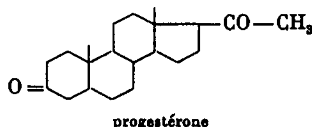
بین آنها می‌تواند پیوندهای دوگانه وجود داشته باشد و روی آنها ممکن است تعداد O، OH یا CH_3 مستقر شده باشند. وانگهی یک زنجیر خطی گاهی روی یکی از کربنهای حلقهٔ آخر پدید می‌آید. تبدیل یک هورمون به دیگری تنها با تغییرات جزئی عناصر افزایشی در ساختار پایه، امکانپذیر است:



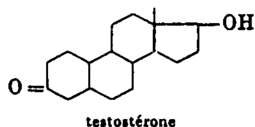
œstradiol



folliculine



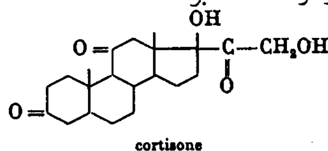
progestérone



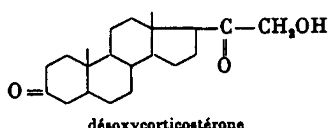
testostérone

در طی سالهای ۴۰، سنتز بیشتر این ستروئیدها عملی و ساخت شیمیایی آنها در امریکا که بیست سال بعد سال در هر سال یک تن فولیکولین تولید می‌کرد شروع شد.

همین نوع ترکیب در اجسامی که از کپسولهای فوق‌کلیوی به‌دست می‌آمد. یافت شد. همین تحقیقات همزمان بوسیلهٔ رایششتاین در سویس و نیز توسط ونیترشتاینز[1] و کندال در امریکا انجام می‌گرفت. این دانشمندان زیست‌شیمی، ۲۸ ستروئید را جدا کردند که شش‌تای آنها فعالیت فیزیولوژیکی داشتند. در سال ۱۹۳۸ فرمول دزوکسی‌کورتیکوسترون توسط آقای رایششتاین معلوم شد و پس از آن همهٔ دانشمندان بزرگ شیمی آلی آن زمان در توضیح فرمولهای ترکیبات دیگر و مشتقاتی از آنها که فعالیت فیزیولوژیکی دارند، شرکت کردند. نخستین ساخت سنتزی آنها، بخشی در آغاز سالهای ۱۹۴۰ بود که به تولید شیمیایی ردهٔ تازه‌ای از داروها انجامید و تولید آنها در ممالک متحدهٔ امریکا در هر سال سریعاً به چندین تن در سال رسید، در حالیکه همهٔ امکانات هنوز به‌کار گرفته نشده بود:



cortisone



désoxycorticostérone

سنتز این هورمونها همیشه از راه شیمیایی نبوده است. هورمون پروژسترون بوسیلهٔ اجسام زرد

1. Wintersteiner

تخمدان، پس از عادت ماهانهٔ زنان، ازکلسترول یا از فیتوسترول در مقیاس صنعتی به‌دست آمد. این هورمون افزون بر کاربرد درمانی، برای تولید ترکیب واسطه‌ای جهت ساخت کورتیزون به‌کار می‌رود. راههای گوناگونی برای تولید کورتیزون شناخته شده‌اند که در آنها تثبیت گروه OH روی یک محل مورد نظر مولکول استروئید، با عمل میکروبیولوژی انجام می‌گیرد. دنبالهٔ این تولید شامل تعدادی واکنشهای شیمیایی است که برای کامل شدن، مستلزم گذر از مراحل متعدد دقیقی است.

هورمونهای هیپوفیز: به طوری که ذکر شد، کشف هورمونهای جنسی مقدمه‌ای برای کشف هورمونهای هیپوفیز شد. این غده که در قاعدهٔ مغز قرار دارد، بسیار کوچک است و دارای دو منطقهٔ ترشح هورمونی است. ترشحات لپ جلویی می‌تواند شامل ۲۴ هورمون مختلف باشد که ده‌تای آنها جدا و شناخته شده‌اند و هورمونهای تحریک، بر ترشح هورمونهای جنسی فرمان می‌دهند. جملگی، پولی‌پپتیدهایی هستند چنان کمپلکس، که شیمیدانها، نتوانسته‌اند آنها را سنتز کنند. برای ساخت آنها از هیپوفیز خوک استفاده می‌کنند و مستلزم عملهای زیست‌شیمیایی بسیار دقیقی است.

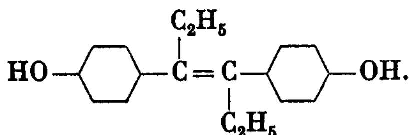
از قسمت پشتی هیپوفیز سه هورمون به‌دست آمده است، اکسیتوسین oxytocine که انقباض عضلات رحم را در زایمان کنترل می‌کند؛ وازوپرسین vasopressine که فشار خون را تنظیم می‌کند؛ آدیورتین adiurétine که داروی دیابت بی‌مزه است. جدا کردن این سه هورمون را گروه اُکام[1] شیمیدان امریکایی در ۱۹۲۸ انجام داد و در سال ۱۹۵۴ آقای دو وینیو[2]، باز در امریکا، فرمولی و روشی برای سنتز این هورمونها پیشنهاد کرد و ساخت شیمیایی آن بیدرنگ شروع شد.

پژوهشهای دو وینیو سبب شد که از همان زمان پیش‌بینی کنند که وظیفهٔ هیپوفیز به‌عنوان تنظیم‌کنندهٔ هورمونی ارگانیسم، خود به فرمان ترشحات مناطقی از مغز است که هیپوتالاموس نام دارد و گروهی از رگهای میکروسکوپی آنها را به یکدیگر وصل می‌کنند. هورمونهای وازوپرسین و اکسیتوسین که توسط دو وینیو کشف شدند نیز خود از عوامل هیپوتالاموس هستند که از قسمت پشتی هیپوفیز، پخش می‌شدند. عامل سوم، کوهرین coherine نیز در سال ۱۹۷۳ جداسازی شد. در مورد قسمت جلویی باید گفت که ترشح‌کنندهٔ هورمونهایی است که بر رشد، ترشح غدد فوق‌کلیوی (کورتیکوسترون)، تیروئید (تیروکسین) و گونادوتروپها gonadotropes (تستوسترون، پروژسترون، اُستروژنها) فرمان می‌رانند. اما خود آن نیز از هورمونهای ترشح شده از هیپوتالاموس فرمان می‌گیرد. در طی سالهای ۶۰ دو گروه دست به‌کار استخراج آنها در مقیاس نیمه صنعتی از میلیونها مغز حیوانات برای تهیهٔ حدود یک میلیگرم از یکی از این هورمونهای با نشانهٔ TRF

1. O.Kamm 2. Du Vigneaud

شدند. پس از اینکه ساختار TRF به‌طور تقریبی مشخص شد، هر دو گروه: گروه دکتر اوویلمین[1] و گروه دکتر شالی[2] توانستند با تقریبهای پیاپی در سال ۱۹۷۰ راه سنتز آن را بیابند، و در ۱۹۷۲ سنتز یکی دیگر از این هورمونهای مغزی، LRF را به‌دست دهند. این نمونه نشان می‌دهد که با وجود اهمیت نتایج به‌دست آمده، زیست‌شناسی و شیمی گویا هنوز باید فراورده‌های متعدد واجد فعالیتهای اساسی دیگری را کشف و تولید صنعتی آنها را نیز تأمین کنند.

بدین‌ترتیب، قلمرو صنعت دارو ـ شیمی، پس از حدود چهل سال، در سایهٔ وسایلی که شیمی وارد بیولوژی و فیزیولوژی کرده بود گام به مرحلهٔ تحولی گذاشت. نه‌تنها خانواده‌های بزرگ ترکیبات فعال، مورد استفاده باقی ماندند، بلکه پژوهش شیمیایی، این واقعیت را روشن ساخت که اجسامی با فرمولهای بسیار متفاوت از بعضی عوامل شناخته شده، فعالیتی مشابه و برابر با آنها دارند. به‌عنوان نمونه از هورمونهای اُستروژن مصنوعی نام می‌بریم که نخستین آنها دی‌اتیل استیبوسترول است و به توسط آقای دودز در سالهای ۱۹۳۷ ـ ۱۹۳۸ ساخته شد و مانند مشتق هیدروژندار خود، خصوصیاتی هم‌ارز اُسترادیول دارد



ترکیبات دیگری که پژوهش‌گران متعددی آنها را مطرح ساختند در دنبالهٔ گسترش فهرست فراورده‌های شیمیایی موجود در درمان وارد شده‌اند.

گرچه کمیت تولید این شاخهٔ ویژه از شیمی صنعتی برای هیچ‌یک از فراورده‌های متعدد بازرگانی خود رقم چشمگیری نیست، این واقعیت که آنها جز به مقادیر بسیار اندک به‌کار نمی‌روند، اعتبار اقتصادی قابل توجهی به آنها می‌بخشند. ضمناً تأثیر آنها بر کارایی درمان پزشکی در سراسر جهان نیز باید به‌حساب آورده شود.

مواد سنتزی

تا اینجا دیدیم که تحول صنعت شیمی در طی «سدهٔ نخست بیستم» با پیدایش روشهای سنتز در صنعت نیتروژن و اسید سولفوریک، تهیهٔ فراورده‌های مصنوعی، معمولاً از مواد طبیعی و تقسیم‌بندی ساختهای مواد آلی، که غالباً تا سنتز صنعتی برای مواد پاکسازی، ضدانگل و ترکیبات دارویی زیستی به پیش می‌روند، مشخص می‌شود.

اما، موازی با این خطوط بزرگ تحول، در طول همین دهه‌ها، تحول دیگری هم روی داد که

1. Huillemin 2. Schally

چهرهٔ شیمی صنعتی و نیز ساختار آن را، از آنچه که در سالهای ۳۰ بودند، کاملاً تغییر داد.

گرچه در کوشش برای دریافت روند کلی این تحول، باید خطوط گوناگونی را که غالباً انگیزهٔ کنجکاوی داشته‌اند از انواع پژوهشها یا نیازهای اقتصادی و اجتماعی مشخص، تفکیک کرد، این هم درست است که جملگی در سراسر تاریخ خود با یکدیگر بستگی داشته‌اند و هیچ‌یک جانشین دیگری نشده است. گسترش سریع مواد پلاستیکی والیاف مصنوعی مثلاً جانشین مشتقات سلولوزی، فنوپلاستها و آمینوپلاستها نشدند. بااین‌حال، این مرحلهٔ واپسین تحول صنعت شیمی، بدین دلیل آغاز شد که مراحل دیگر سپری شده بودند.

وانگهی کنجکاوی پژوهندگان متوجه ساختار ترکیبات طبیعی مانند سلولوز یا کائوچو شده بود و از سوی دیگر، واکنشهای هیدروژندهی به مواد دیگری غیر از نیتروژن، گسترش یافته بود، و بالاخره دشواریهای بسپارشی، به‌طور علمی برطرف شدند، زیرا بر علتهای تشکیل آنها به‌طور کاملاً سنجیده‌ای آگاهی یافته بودند.

نخستین آگاهیها از درشت‌مولکولها: از همان اواسط سدهٔ نوزدهم، شیمیدانها از ترکیب خام مواد طبیعی که صنعت دست به استخراج و تبدیل آنها به مواد دیگر زده بود ـ که سلولوز و کائوچو، از جنبهٔ صنعتی، مهمترین آنها بودند ـ آگاهیهای دقیقی به‌دست آورده بودند. حدود سه‌چهارم یک سده، کار روی این مواد بی‌وقفه ادامه یافت. از دوران نخست، تا آغاز سدهٔ بیستم، تنها روشهای شیمیایی، فعال بودند و امکان موفقیت با این روشها روزافزون بود، بدون اینکه امیدی به پایان کار به‌وجود آید. گرچه بزودی این آگاهی به‌دست آمد که این مواد از زنجیرهای طویل مولکولی، با تکرار منظم یک الگو تشکیل شده‌اند، اطلاع بر روابط موجود میان ساختار شیمیایی و سازمان فیزیکی هریک از آنها محال می‌نمود. مسألهٔ آرایش مولکولی را نمی‌توانستند از راههای سادهٔ شیمیایی حل کنند. این ترکیبات عظیم را به‌عنوان مواد بی‌شکل می‌نگریستند و این حالت، اجازهٔ هیچ تفسیر فیزیکو ـ شیمیایی خواص آنها، نظیر: افزایش طول، کشایی، مقاومت دربرابر پارگی، استعداد ریسیدگی و غیره را نمی‌داد.

نخستین مواد پلاستیکی و الیاف مصنوعی، مشتقات سلولوز، باکلیت، و بعداً متیل کائوچوی هوفمان، در دورانی ساخته شدند که آگاهیهای کافی به‌دست آمده بودند. خوشنودی از تولید مصنوعی ردیف مفصلتری از مواد طبیعی، دلمردگی ناشی از بی‌اطلاعی از ساختار همه آنها را جبران می‌کرد. کم اطلاعی نسبت به‌این صنعت جدید، که هنوز در مرحلهٔ آزمایش بود، نه‌تنها رشد آن را نساخت بلکه نوآوران را بیشتر به کشف خواص اورگانو فیزیکی فراورده‌های جدید، برای

استفاده‌های فنی و اقتصادی از آنها برمی‌انگیخت، تا اینکه این فراورده‌ها مشخصات دلخواه را به‌دست آورند. شکست کائوچوی مصنوعی اولیه، که در جنگ جهانی اول در آلمان ساخته شد، بخوبی ثابت کرد که عدم آگاهی از ساختار مواد طبیعی درشت‌مولکول، چه موانعی ایجاد می‌کند.

دربارهٔ کائوچو باید گفت که همان‌طورکه ذکر شد (صفحه ۶۷۲) که ایزوپرن، ترکیب آلی پایهٔ آن، بسرعت شناخته شد. آقای بوشاردا در سال ۱۸۷۹ متوجه شد که این کربور دو اتیلنی اگر همراه با اسید کلریدریک غلیظ گرم شود بسپار می‌گردد، و یک

$$CH_2OH—CH(NH_2)—CO_2H$$

جرم لاستیکی شبیه کائوچوی طبیعی به‌دست می‌آید. از این مشاهدات اولیه، ردیفی از روشها در آلمان و انگلستان برای تثبیت بهترین شرایط بسپارش کربورهای دواتیلنی پدید آمد. فرانسوا هوفمان و همکارانش، راهی برای تهیهٔ دی‌متیل‌بوتادی‌ان یافتند که در اقتصاد زمان جنگ می‌شد آن را نسبتاً اقتصادی نامید.

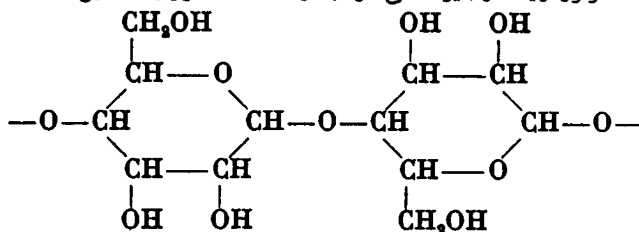
روش وی برپایهٔ هیدروژندهی به استون بود. مؤسسه رنگ‌سازی بایر در سال ۱۹۱۲ اختراعی را به ثبت رسانید که شامل روشی بود که در سالهای ۱۹۱۴ - ۱۹۱۸ در آلمان برای بریدن از منابع رزینهای طبیعی به‌کار گرفته می‌شد. به مجرد پایان مخاصمات، ساخت این نوع کائوچو، به‌علت هزینهٔ بالای تولید و کیفیت پایین آن، کنار گذاشته شد.

ترکیب شیمیایی دو خانوادهٔ بزرگ دیگر مواد طبیعی، هولوسیدها holosides و پروتئیدها و نیز آگاهیهای نخستین دربارهٔ ساختار مولکولی آنها، در اثر همگرایی کارهای متعدد در همان دهه‌ها به‌دست آمدند. از جمله شیمیدانهایی که در پایان این دوره بسیار درخشید آقای امیل فیشر آلمانی است که در سالهای ۱۸۸۴ و ۱۹۰۰ ماهیت مولکولی هولوسیدها و پلی‌هولوسیدها (سلولوز، آمیدون) و نیز بعداً در ۱۹۰۰ تا ۱۹۰۶ پروتئیدها را توضیح داد.

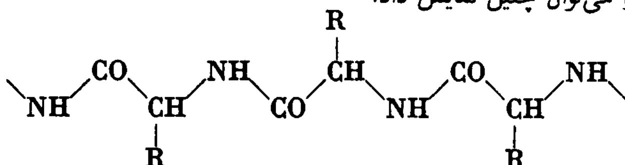
دربارهٔ ردیف نخست‌باید گفت که آقای فیشر ثابت کرد که مولکول پایهٔ آن، گلوکوز است و فرمولی با شش کربن راستخط برای آن پیشنهاد کرد. در همان زمان آقای والتر نورمن هاورث[1] و همکارانش در بررسی گلوکوز و فراورده‌های بسپارش آن (فراورده‌های ناشی از تجزیهٔ سلولوز بوسیلهٔ هیدرولیز، مانند سلوبیوز cellobiose) یک فرمول ناجور حلقه (هتروسیکلیک) پیشنهاد کردند. آنان

1. Walter N.Haworth

بدین‌ترتیب معتقد شدند که سلولوز از یک زنجیر خطی مرکب از حلقه‌های فراوان تشکیل شده است:



دربارهٔ پروتئیدها، باید متذکر شد که تجزیه کنترل شدهٔ زنجیرهای درشت‌مولکول سازندهٔ آن و جداسازی ظریف مولکولهای ساده‌تری که بدین‌ترتیب به‌دست می‌آیند، نشان می‌دهند که عناصر اصلی آنها آمینو اسیدهای نسبتاً معدودی هستند و به‌شکل آمیدهایی با یکدیگر اتصال دارند. نمای کلی زنجیرهای پروتئیدی را می‌توان چنین نمایش داد.



مثلاً ترکیب شیمیایی ابریشم رفته‌رفته پیش‌بینی شد. تار ابریشم، یک لایهٔ خارجی از سرین، آمینو اسید الکل: $CH_2OH-CH(NH_2)-CO_2H$ دارد و یک تار داخلی، فیبروئین، که آنالیز آن نشان می‌دهد که از حدود ده آمینو اسید ساخته شده است که فراوانترین آنها عبارتند از: گلیکوکول ۴۰٫۵٪ که ساده‌ترین آمینو اسیدهاست و آلامین ۲۵٪ که همرده و بلافاصله بالاتر از گلیکوکول قرار می‌گیرد.

شیمی درشت‌مولکولها: کار شناسایی بزرگ مولکول اجزای این مواد طبیعی به‌مدت چندین دهه ادامه داشت و درهمان‌حال نتایج صرفاً شیمیایی، بدون سستی و اهمال مورد بررسی قرار می‌گرفتند و تکمیل می‌شدند. ساختار دارای زنجیرهای طولانی مولکولی کائوچو که در سال ۱۹۰۰ آقای وبر آن را حدس زده بود پس از گذشت بیش از بیست سال، آن هم پس از کارهای شمار زیادی از شیمیدانها، و در پیشاپیش آنان آقای هرمان شتاودینگر تأیید و معلوم شد که همهٔ مواد پلاستیکی، بویژه پلاستیکهای مصنوعی که در آن زمان به‌کار می‌رفتند از زنجیرهای راست و طویلی ساخته شده‌اند که تحت تأثیر هر نوع دستکاری، به‌شکل شبکه‌های سه بعدی به یکدیگر متصل می‌شوند.

در همین دهه‌های ۲۰ و ۳۰ بود که شاخه تازه‌ای از دانش شیمی، شیمی درشت‌مولکولها، به‌وجود آمد اما تا زمانی‌که بروشهای فیزیکی برای کمک بروشهای شیمیایی کلاسیکی شیمی آلی روی نیاورده بود نمی‌توانست شکل بگیرد. روشهایی که نخست به یاری خوانده شدند مربوط به

بررسی محلولهای کلوئیدی بودند که قوانین بنیادی آنها در آزمایشگاهها به‌دست آمده بودند و به بررسی حالات ماده می‌پرداختند. یک جریان تحقیق علمی در آغاز سدهٔ نوزدهم پدید آمد و با حل پیوستهٔ مسایل پیش آمده، لاینقطع به پیش می‌رفت.

فیزیکوشیمی کلوئیدها: بدین‌ترتیب شیمی درشت‌مولکولها توانست مجموعه‌ای از روشها در اختیار داشته باشد که با آنها بتواند نه‌تنها حدود بزرگی مولکولها بلکه مقدار بسیار نزدیک ـ اگر نه دقیق ـ ابعاد مولکولهای غول‌پیکر را، که مدتها در پی آن بودند، به‌دست دهد. قوانین انجمادسنجی (کریوسکوپی) و تونومتری[1] که اطلاعات دقیقی برای مولکولهای کوچک می‌دهند، برای درشت‌مولکولها، مقداری که به‌دست می‌دهند بسیار تقریبی است. اما، برعکس، پدیده‌هایی که به محلولهای بلورنما و نیز کلوئیدها مربوط می‌شوند اندازه‌گیریهای رضایتبخش‌تری دارند. همین وضع برای اندازه‌گیری فشار اوسمزی، نفوذ نور تکفام، رسوب شتابنده بوسیلهٔ مرکزگریزکردن و سپس مرکزگریزکردن سریع[2] که با روشهای نوری قابل مشاهده است، وجود دارد. این فرایندها به تقریب یک دست یافتند، و در اواخر سالهای ۳۰ استقرار فرضیه‌های دارای جنبهٔ عمومی را ممکن ساختند. مثلاً دستگاه مرکزگریز سریع سودبرگ[3] که بوسیلهٔ این پژوهنده و همکارانش، برای تحقیق پروتئیدها به‌کار گرفته شد، اطلاعات به‌دست دادند که بر پایه آنها درشت‌مولکولهای پروتئیدها، باید از مولکولهایی با جرم ۱۷۶۰۰ ساخته شده باشند. کنارگذاردن روشهای دیگر، بویژه روشهای شیمیایی، ظاهراً نشانهٔ تأیید این ادعاست که جرم مولکولی شمار زیادی از پروتئینهای شناخته شده، به ضریبی از این واحد نزدیک است: پپسین ۳۷۳۰۰، انسولین ۳۸۰۰۰، ویروس پروتئین موزائیک تنباکو ۱۷ میلیون (حدود ۲۰ میلیون).

همه می‌دانند که بویژه این ویروس بوسیله استنلی مورد بررسی قرار گرفت و آن را در ۱۹۳۵ به‌شکل بلور جدا کرد. از جمله بررسیهای دیگری که در این زمان با روشهای گوناگون انجام گرفت نشان دادند که ویروسهای پروتئینی، یک مرحله واسطه‌ای بین جانداران و درشت‌مولکولها می‌باشند.

بدین‌ترتیب، مجموعه‌ای از پژوهشها در زمینه‌های بسیار گوناگون و تکنیکهای جدید شیمی آلی برای دست یافتن به آگاهیهای اساسی و روشهایی برای اندازه‌گیری و کنترل، کمک کردند. خاصیت دیگری از محلولهای کلوئیدی، ویسکوزیته (لزوجت)، که به‌نظر پژوهندگان، اندازه‌گیری آن برای آگاهی بر بزرگی مولکولها به‌اندازهٔ روشهای پیش‌گفته شده اطمینان‌بخش نیست، بیشتر بوسیلهٔ تکنسین‌ها به‌کار گرفته شد. حدود سال ۱۹۲۵ آقای شتاودینگر رابطهٔ جرم مولکولی بسپارهای بالا و ویسکوزیتهٔ مخصوص آنها را با کارهای تجربی به‌دست آورد. ویسکوزیته‌سنجهای پیشنهادی

۱. اندازه‌گیری وزن مولکولی بروش پایین آوردن فشار بخار محلول. ـ م

۲. اولتراسانتریفوگاسیون ـ بیش از ۶۰۰۰۰ دور در دقیقه. ـ م.

3. Svedberg

سازندگان مختلف در آزمایشگاههای صنایع رواج یافتند.

پراش اشعهٔ X: دستاورد دیگر فیزیک، پراش اشعهٔ X، روشهای اطمینان‌بخشی برای آگاهی بر ساختار بسپارهای طبیعی و مصنوعی بالا، فراهم کرد.

ماهیت موجی اشعهٔ X را در سال ۱۹۱۲ آقای ماکس فون لاوئه[1] کشف کرد، و دو همکار جوان وی آقایان و. فریدریش و پ. کینپینگ[2] با استفاده از یک بلور سولفات مس آن را نمایش دادند. این کشف سبب شد که در فهرست اجسام پرتودهندهٔ الکترومغناطیسی اشعهٔ X بالاتر از فرابنفش جای گیرد، و علاوه بر آن، این اشعه وسیله‌ای برای بررسی آرایش اتمها در ساختار بلورها، در اختیار فیزیکدانان و بلورشناسان گذاشت. اما باید ده سال می‌گذشت تا بتوانند با این وسیله زوایا و ابعاد را به کمک پراش اشعهٔ X اندازه بگیرند. آقای ویلیام هنری. برگ[3] و پسرش لارنس در سال ۱۹۱۴ نشان دادند که انحراف دستهٔ اشعهٔ X می‌تواند به این اندازه‌گیریها خدمت کند و نخستین طیفسنج با اشعهٔ X را ساختند. آقایان پ. دبای[4] و پ. شرر[5] در زوریخ در ۱۹۱۶ و آقای ا. و. هال[6] در ۱۹۱۷ جدا از یکدیگر با به‌کارگرفتن اجسام آسیا شده به‌جای بلورهای بزرگ، این تکنیک را به‌پیش راندند. جنگ وقفه‌ای در این تحقیق ایجاد کرد، اما حدود سال ۱۹۲۶ با کاربرد آن در طیفسنجی میدان گسترده‌ای یافت.

روش دبای و شرر بی‌درنگ به‌عنوان وسیله‌ای برای کنترل و آنالیز در صنعت در مورد اجسامی نظیر رنگ‌ها، فلزها، خوردگیها و غیره به‌کار گرفته شد. از سوی دیگر، پیشرفتی که این وسیله به بلورشناسی داد آن را در جهت بررسی اجسامی، در ابتدا نظیر گرافیت و الماس، به پیش راند و توانستند ساختار متبلور آنها را بشناسند و آنها را در ردهٔ اجسام درشت‌مولکول به‌شمار آورند. بر این پایه، به بررسی اجسام نامتبلوری که از مولکولهای درشت آلی ساخته شده‌اند و بالاخره به بررسی آرایش درشت‌مولکولهای اجسام طبیعی، مانند کائوچو، سلولوز ابریشم یا اجسام مصنوعی نظیر مواد پلاستیک ساخت سالهای ۳۰ روی آوردند.

پراش اشعهٔ X کاربردی بسیار طولانی و ظریف دارد، زیرا تفسیر کلیشه‌های آن، مستلزم مقایسه‌ها و محاسبات فراوان است. بااین‌حال، این کار، خود به‌صورت تکنیکی بسیار مطمئن ارائه شده است. توزیع چگالی الکترونی در روی کلیشه‌ها، در واقع با توزیع تعداد اتمهای یک مولکول، همان‌گونه که آقای رابرتسن[7] در سال ۱۹۳۳ نشان داد، هماهنگ است. پیکربندی آن، شناخت پیوندهای درونی مولکول یا بین مولکولها را ممکن می‌سازد، و فواصل هسته‌های اتمها، فواصل

1. Max von Laue 2. P. Knipping 3. W.H.Bragg 4. P. Debye 5. P. Scherrer
6. A.W.Hull 7. Robertson

مشخصهٔ گروههای معین را نشان می‌دهد، مثلاً ۱٫۵۴Å برای پیوند میان دو کربن راست زنجیر، و ۱٫۴۲Å را میان دو کربن و زنجیر حلقوی، و ۱٫۳۲Å را برای پیوند اتیلنی، ۱٫۱۹Å برای پیوند استیلنی و غیره*.

در اواخر سالهای ۳۰، مجموعهٔ جالبی از روشهای فیزیکی در دسترس دانشمندان شیمی آلی قرار گرفت که در آن زمان برای اجرای سنتز اجسام تازه‌ای تلاش می‌کردند و نیز همان‌طور که دیدیم، انواع و اقسام واکنشهای شیمیایی بسیار انعطاف‌پذیر در اختیار آنان بود.

نخستین نزدیکی به مواد سنتزی: می‌توان تقریباً سه دوره را در پیدایش صنعت مواد سنتزی تشخیص داد. از آغاز این سده تا پایان جنگ جهانی اول، چند اقدام اولیه و محدود در فضای آزمایشگاهی انجام گرفت.

آقای اوتو رُم[1] از سال ۱۹۰۰ بررسی ترکیبات آکریلیک و متاکریلیکی را که از اسیدهای مربوطه $CH_2=CH-COOH$ و $CH_2=C(CH_3)-COOH$ یا از نیتریلها مشتق می‌شوند آغاز کرد. وی شاهد پدیده‌های بسپارشی بود که این ترکیبات ایجاد می‌کنند. اما سی سال پس از این تاریخ، یعنی در دورهٔ دوم بود که صنعتی شدن ساخت این بسپارها، همزمان در انگلستان، ممالک متحدهٔ امریکا و آلمان عملی شد.

آقای اسمیت در سال ۱۹۰۱ با استری کردن اسید فتالیک $C_6H_4(COOH)_2$ یا با انیدرید این اسید به کمک گلیسرین، نخستین ترکیب گلیسروفتالات را ساخت. این اسید در آن زمان، فراوردهٔ واسطه‌ای ساختِ اندیگو بود. بررسی این استری کردن، راه را در سال ۱۹۲۷ برای تهیهٔ روغن خشکانه (سیکاتیف) مصنوعی، و نیز بسپارش آنها، که در ساخت رنگ کاربرد دارد، باز کرد.

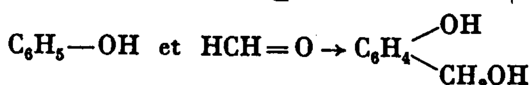
بسپارهای کلوئیدهای وینیل $CH_2=CHCl$ و دیگر ترکیبات وینیلی، مثلاً استات وینیل و وینیل بنزن یا استیرولن (استیرن) $CH_2=CH-C_6H_5$ موضوع تحقیقات آقای کلاته[2] در سالهای ۱۹۱۲ ـ ۱۹۱۴ بود. طی جنگ جهانی اول، همین شخص در آلمان ساخت کلر استات پولی وینیل را که بعدها بنفع استات کنار گذاشته شد، شروع کرد.

این دورهٔ اول با تولید نخستین کائوچوی سنتزی هوفمان، که دربارهٔ آن سخن گفته‌ایم، نیز مشخص می‌شود.

*. یادآوری می‌شود که Å یا آنگستروم برابر یک‌دهم میلیونیم یک میلیمتر است.ـم.

1. O.Rohm 2. Klatte

بسپارشهای صنعتی: دورهٔ دوم اوایل سالهای ۳۰ آغاز می‌شود، گرچه واقعاً در ادامهٔ کوششهای دانشمندانی از شیمی آلی که برای صنعت کار می‌کردند گسستگی وجود نداشته است. در واقع در طی این تأخیر آشکار انتقال بود که در سایهٔ پژوهشهای شتاودینگر و گروه وی، نیز تعداد زیادی شیمیدانها و فیزیکدانانی که بویژه در آلمان و امریکا کار می‌کردند دربارهٔ ساختار درشت‌مولکولها، که قبلاً ذکر آنها رفت، آگاهیهای تازه‌ای به‌دست آمد. سالهای ۳۰ با آغاز تولید صنعتی بسپارهای بزرگ یا هم‌بسپار (کوپولیمر)های سنتزی مشخص می‌شود. در همین سالهاست که روشهای گوناگون بسپارش قابل استفاده در مقیاس صنعتی کشف شدند. در حقیقت این مشکل روز بود، مشکل انتقال سنتز درشت‌مولکولها از آزمایشگاه به کارخانه. گرچه به فهم مکانیسمهای شیمیایی بسپارش: پیوند عامل به عامل(مثلاً عامل آمین به عامل اسید، چیزی که آقای والاس هیوم کراتزز[1] بعدها آن را بررسی کرد)، میعان و تراکم همراه با حذف آب از نوع:



$$C_6H_5{-}OH \text{ et } HCH{=}O \rightarrow C_6H_4\begin{matrix}\diagup OH\\ \diagdown CH_2OH\end{matrix}$$

که اکنون به‌طور تجربی، صنعتی شده است، یا بسپارشهایی از راه افزایش روی پیوند اتیلنی، که در آنها شاهراهی به‌سوی یک کاتالوگ غول‌پیکر از فراورده‌های تجارتی باز شد، دست یافته بودند کاربرد این فرایندها در صنعت، مستلزم اصلاح شماری از روشهای کلی بود که هر یک از آنها در ردیفهایی از ترکیبات واسطه‌ای کاربرد داشتند. تقریباً طی ۲۰ سال میان ۱۹۳۰ ـ ۱۹۵۰ این تکنیکها بررسی و روبه‌راه شدند، اما این بدان معنی نیست که این تکنیکها بعدها دستخوش تحول نشده‌اند.

مشکل کار، تعیین محیط و شرایط فیزیکوشیمیایی بود که بسپارشها باید در هر مورد برای رسیدن به بهترین بازده، چه کمی و چه کیفی، واجد آنها باشند. در واقع، با درجهٔ مورد نظر بسپارش، که با این یا آن روش کلی موجود به‌دست می‌آمد، روش تولید عبارت خواهد بود از راه امولسیون در واکنشگاه (رآکتور)ها و حضور بعضی کاتالیزورها، یا راه محلول کردن تکپار (مونومر) با رسوب دادن بسپار.

بسپارهای وینیلی: با استفاده از فرایند تعلیق در امولسیون بود که بسپارهای وینیلی که بیست سال پیش بوسیلهٔ آقای کلاته بررسی شده بودند برای نخستین بار تهیه شدند. مهمترین این بسپارها، ترکیبات آکریلیکی و متاکریلیکی هستند که مؤسسه آقای اوتو رُم و همکارش آقای هاس در آلمان در سال ۱۹۲۷ ترکیبات نخستین و در سال ۱۹۳۵ ـ ۱۹۳۶ ترکیبات متاکریلیکی را ساختند. ساخت ترکیبات پلی‌متاکریلات صنعتی در مدت نسبتاً کمی در سال ۱۹۳۱ بود و برکارهای آقای

1. Wallace Hume Carothers

چالمرز[1] کانادایی تکیه داشت. آقای چالمرز کشف کرد که متاکریلات اتیل و نیز نیتریل متاکریلیک می‌توانند متحمل نوعی هم‌بسپارش شوند، و این یک شیشهٔ آلی واقعی با خواص نوری جالب توجه است. شیشه‌های متاکریلیکی را مؤسسات بزرگی در آلمان، انگلستان و امریکا حدود سال ۱۹۳۶ در مقیاس صنعتی تولید کردند و با نامهای گوناگونی: لوسیت بوسیلهٔ دوپون دونمور، پلکسی‌گلاس بوسیلهٔ شعبات امریکایی رُم و هاس به فروش می‌روند. همین نام اخیر است که در فرانسه، آلمان و ایتالیا بسیار شهرت دارد.

مشتقات دیگر آکریلی در همان زمانها یا کمی بعد مورد استفاده قرار گرفتند. مثلاً آکریلونیتریل بتدریج از سال ۱۹۴۱ موضوع پژوهش آقای هیل چارچ[2] از دوپون دونمور برای ساختن الیاف سنتزی بود درحالی‌که شیمیدانهای بایر در آلمان در سال ۱۹۴۲ به همین پژوهش دست زدند. امریکاییها که تقدیر با آنان همراه بود در سال ۱۹۴۸ اورلون را به بازار فرستادند، و درالون ساخت آلمان شش سال بعد ساخته شد.

در دورهٔ پیش از جنگ، ساخت پولی‌وینیلها در کشورهای نوآور در شیمی صنعتی سنتزی بسرعت به‌پیش رفت. چون ردیف ترکیبات وینیلی بسیار طولانی است بنابراین، فهرست فراورده‌های بسپارش یا هم‌بسپارش آنها نیز مفصّل است. در سال ۱۹۳۱ کلرور پولی‌وینیل سبب شد که یک فراوردهٔ پرکلری محلول در استون ساخته شود و در آلمان به‌شکل نخ ریسیده برای صنعت و با نام PeCe به بازار آید. این کلرید پولی‌وینیل که بعدها به پی‌وی‌سی PVC شهرت یافت، ساخت این نوع مواد را توسعه داد ـ موادی که با افزایش روشهای عمل آوردن آنها، استفاده از مواد نرم‌کننده و تحویل آنها در شکل ورق، مفتول، خمیر و غیره، کاربردهای بسیار گوناگونی یافتند. در فرانسه یک نوع الیاف کم کلر را آقای ژ. کوربیر[3] در سالهای ۴۰ برای رودی‌آستا Rhodiacéta روبه‌راه کرد که در سال ۱۹۵۰ با نام rhovyl وارد بازار شد.

هم‌بسپارش مشتقات وینیل با یکدیگر، چشم‌انداز تنوع فراورده‌ها را باز هم گسترده‌تر کرد. باید ساخت مشتقات فلوئوری، مانند ترافلوئور اتیلن را که تنها دارای کربن و فلوئور است و امکانات هم‌بسپار شدن آن را شرکت دوپون دونمور در سال ۱۹۴۱ پیش‌بینی کرده بود، نیز در نظر گرفت. چند سال بعد این پارافینهای فلوئوردار که نسبت به عوامل شیمیایی کاملاً غیرحساس می‌باشند نخست با نام تفلون، پس با نامهای دیگر روانهٔ بازار شدند.

کشپارهای سنتزی: مواد واسطه‌ای با پیوندهای اتیلنی، در همین دوره به ساخت کشپار (الاستومر)های سنتزی در همه کشورها، بویژه در آلمان، ممالک متحدهٔ امریکا و

1. Chalmers 2. Hale Charch 3. J. Corbiere

اتحاد جماهیر شوروی [سابق] رسیدند. این ماده احتمالاً بسیار سریع وارد مرحلهٔ ساخت صنعتی شد. آموخته‌های جنگ جهانی اول، عوامل اقتصادی و سیاسی میان دو جنگ، آلمان را برانگیخت که بویژه در سالهای ۳۰ به فراورده‌های جانشینی توجه کند تا از نیازمندی به ماوراءبحار آزاد شود. روسیه هم در دورهٔ نزدیک به جنگ، همین احساس را داشت و ممالک متحدهٔ امریکا، پس از شروع تجاوز ژاپنی‌ها، به کارهای خود شتاب زیاد دادند.

بررسی‌ها، نخست روی بسپارش کربورهای دی‌انی تمرکز یافت که در زنجیرهای خود، دو پیوند دوگانه داشتند تمرکز یافتند. تکپار پایه‌ای آن بسیار ساده، بوتادی‌ان $H_2C=CH-CH=CH_2$ است که واکنش بسپارش روی زنجیر آن مدتها مورد بررسی بود. حدود سال ۱۹۲۹ شیمیدانهای I.G. Farben Industrie متوجه شدند که با عملی کردن هم‌بسپارش بوتادی‌ان و استیرن، تشکیل ساختار پرشاخه را، که عمل آوردن آن بسیار دشوار است، دور بزنند. بنابراین، آنان از سال ۱۹۳۷ ساخت یک ردیف بونا S را با نشانهای S_1 و S_2 ... شروع کردند.

این ردیف که همگی در زمان جنگ ساخته شدند به‌طور منظم به انواع دیگری از بونا گسترش یافتند که مزایای فراوان داشتند.

در همین واکنشهای بسپارش است که امریکاییها در سالهای ۱۹۴۲ ـ ۱۹۴۴ به بازکردن یک ردیف GR-S (Government Rubber-Styrene) تشویق شدند. روسها از سال ۱۹۳۲ در سایهٔ کارهای آقای سرگئی لبدف بسپارهای بوتادی‌ان را، که مشابه بوناهای اولیهٔ آلمانیها بودند و با حروف SKA و SKB (کائوچوی سنتزی Synthetics Kaoutchoucs) مشخص می‌شدند، می‌ساختند و سپس یک هم‌بسپار بوتادی‌ان استیرن SKS را نیز ساختند.

اما راه دیگری هم بیدرنگ باز شد، راهی که با کاربرد کلرور دی‌وینیل $H_2C=CH-CH=CH_2$ یا کلروپرن به پیش رفت. از سی سال پیش می‌دانستند که بعضی از مشتقات کلردار کربورهای اشباع نشده می‌توانند با بسپارش، جسم کشسانی بدهند که هیچ‌کس تا آن زمان کوششی برای تبدیل آن به کائوچوی مصنوعی نکرده بود. در واقع مسأله به کلرور دی‌وینیل استیلن مربوط می‌شد که آقای نیولانت[1] آن را از استیلن ساخته بود. شیمیدانهای دیگری، بویژه آرنلدم. کالینز در آزمایشگاههای دوپون دونمور از نو به آن پرداختند. آقای کالینز بر اثر القاهای کراترز توانست در سال ۱۹۳۱ کلروپرن را تهیه کند و بسپارش آن را به یک کشپار سبب شود. این کشپار با نام نئوپرن شناخته شد و چند سال بعد، ساخت صنعتی آن آغاز گشت. این نیز ردیف طویل دیگری را تشکیل داد که شاخه‌های متعددی داشت و فراوردهٔ سوپرن در شوروی و بعدها پربونان C آلمان به این ردیف تعلق دارند.

1. Nieuwland

به دنبال بسپارش ایزوپرن $\underset{\displaystyle CH_3}{CH_2=\overset{|}{C}-C=CH_2}$ هم‌بسپارش بوتادی‌ان با ترکیبات دیگر وینیلی، از جمله آکریلونیتریل و غیره، تنوع کشپارهای مصنوعی را باز هم بیشتر کرد. واکنش سادهٔ شیمیایی که در هر مورد روی کاغذ نوشته می‌شود، برای ساخت صنعتی آن کافی نبود. می‌بایست مسایل متعدد مربوط به روشهای رایج: نوع و طرزکاربرد مواد امولسیون کننده، ترکیبات اولیهٔ واکنش، اثر کاتالیزورگرها و دمای واکنش (کشف سال ۱۹۴۱ سیستمهای به‌اصطلاح «ردوکس= اکسایش و کاهش» به پیشرفت سرعت بخشیدند) و طبعاً ساختار و ترکیب تجهیزات کار را حل کرد. اگر به این مسایل، دستکاریهای لازم برای تکمیل فراورده‌ها را متناسب با کاربردهایی که برای آنها درنظر گرفته شده است اضافه کنیم متوجه می‌شویم که این، تکنیک صنعتی بزرگ و جدیدی است که در کمتر از دو دهه به بار نشسته است.

سرانجام باید گفت که این کوششهای خلاّقانه، پس از جنگ هم سستی نگرفت، زیرا کشپارهای مصنوعی، مشخصاتی تا آن اندازه گوناگون و رضایتبخش دارند که دیگر نمی‌توان آنها را همچون فراورده‌های سادهٔ جانشین کائوچو دانست؛ موادی هستند که باید کاربرد ویژهٔ آنها در صنایع متعدد، یا تکنیکهای کاربردی آنها را یافت.

پولی‌آمیدها: ردهٔ دیگری از بسپارهای سنتزی که در دورهٔ دوم آفرینندگی پدید آمد، پولی‌آمیدها هستند. سرگذشت نسبتاً کوتاهی دارند، زیرا هنوز ده سال از پیدایش آنها نگذشته است. این رده از چند لحاظ نمونه است. اول اینکه، پولی‌آمیدها گرایشی را به‌طور قاطع ثابت کردند که در این دوره همیشه تأیید شده است، و آن اینکه، پژوهش برای یافتن مواد تازه، دیگر نباید کوششی برای دوباره‌سازی مواد طبیعی باشد. تصادفاً مسأله مربوط به تهیهٔ نوعی الیاف بافندگی بود که بتواند جانشین ابریشم شود. شیمیدانها به این باور رسیدند که گرچه ترکیب شیمیایی ابریشم، شناخته شده است، اما ساخت مصنوعی این الیاف طبیعی محال می‌نماید.

بعداً این رده، کارایی پژوهشی را ثابت می‌کند که بدون اینکه در آغاز، هدف مشخصی داشته باشد انجام گرفته است. آقای والاس هیوم کراترز از سوی دوپون دونمور، در ۱۹۲۸ با عنوان کارشناسی بسپارهای بالا، خارج از یک برنامهٔ معین کاری، به این پژوهش اقدام کرده بود. سرانجام، «اختراع» نایلون ۶۶ میدانی را در برابر کاربردهای مواد تازه گشود که از مرز الیاف سنتزی صرف، بسیار فراتر رفت.

کارهای نخستین کراترز روی بسپارش استری تمرکز یافت که از اثر اسید سوبریک subérique

COOH−(CH۲)۶−COOH acide بر اتیلن گلیکول CH۲OH−CH۲OH به‌دست می‌آمد. پس از اینکه دو سال در این راه تحقیق کرد، معلوم شد که این راه به نتایج دلخواه نمی‌انجامد. اما آقای ج. و. هیل[1] دستیار کراترز به وی توجه داد که این فراورده می‌تواند با گرم شدن، مانند نخ کشیده شود و پس از خنک شدن، این نخها را می‌توان بازکشید تا دارای بهترین کیفیت مکانیکی، استحکام و کشسانی شوند. این مشاهدات، بعدها به ساخت ردهٔ تازه‌ای از فراورده‌های سنتزی منجر شدند. اما در آن زمان کراترز ترغیب شد، که به‌جای گلیکول از دی‌آمین استفاده، و تحقیق کند که نتایج زنجیری شدن آنها با دی‌اسیدها چه خواهند بود.

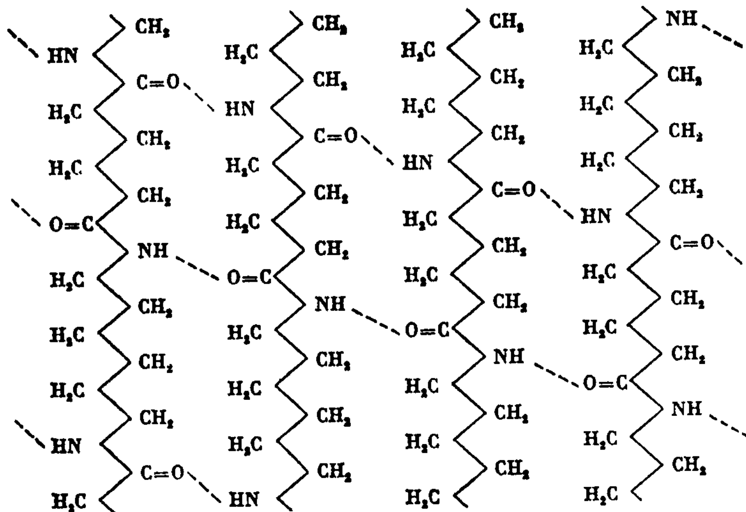
دیدیم که در ۱۹۳۱ آقایان کراترز و کالینز روی نئوپرن کار کردند و تنها در سال ۱۹۳۵، پس از بررسی شمار فراوانی از ترکیبات دو دسته اجسام بود که توانستند با تراکم اسید آدیپیک COOH−(CH۲)۴−COOH و هگزامتیلن دی‌آمین NH۲(CH۲)۶−NH۲، ماده‌ای تولید کنند که می‌توانست به نخ طویلی تبدیل شود و همهٔ خواص ابریشم را داشته باشد.

در آلمان، در همین سالها، آقایان پاول شلاک[2] که به حساب ی. گ. فاربن ایندوستری کار می‌کرد ترکیب کاپرولاکتام را که آمیدی حلقوی از اسید آمینوکاپروئیک

$$\begin{array}{ccc} & CH_2 & \\ CH_2 & & CH_2 \\ CH_2 & & CH_2 \\ & CO\;\;NH & \end{array}$$

است بررسی کرد و راه بازکردن زنجیر و به‌دست آوردن پولی‌آمید خطی را یافت. امکان بسپارش اسید آمینوکاپروئیک در سال ۱۸۹۹ بوسیلهٔ زیگموند گابریل آلمانی و پس از وی در ۱۹۰۷ توسط آقای س. فون براون هموطن وی پیش‌بینی شده بود. اما در آن زمان کسی نمی‌اندیشید که از این راه یک مادهٔ سنتزی نیتروژن‌دار به‌دست می‌آید و شیمی آن زمان، وسیلهٔ این کار را نداشت. خود کراترز از این راه تهیه آگاه بود اما به‌علت دشواریهای موجود در ساخت اسید مربوطه نیز چون این کار با اشکال بازکردن حلقهٔ کاپرولاکتام، که در جریان گرم کردن ایجاد می‌شد مواجه بود و اتلاف قابل توجه آمینو اسید را درپی داشت، از اجرای آن صرفنظر کرد. آقای شلاک درکار خود خوشبخت‌تر بود. نخستین اختراعات ثبت شده کراترز که فاربن ایندوستری آنها را انتشار داد، با صرف وسایل بزرگی برای افزایش نتایج شیمیدان آن همراه بود و توانست در ۱۹۳۸، پرلون، نخستین نخ پولی‌آمیدی را معرفی کند.

---
1. J.W. Hill 2. Paul Schlack



ساختار شبکه‌ای نایلون با پیوندهای میان گروههای CO یک زنجیر و NH زنجیر مجاور، با فاصلهٔ ۴/۸ آنگسترم، ۱۹۴۸.

شرکت دوپون دونمور بنوبهٔ خود کوشش چشمگیری برای صنعتی کردن روش کراترز به‌عمل آورد. تعداد ۲۳۰ شیمیدان آن، مدت سه سال در این راه کار کردند. این مؤسسه بزرگ امریکایی در سال ۱۹۳۸ کارخانه‌ای برای تولید آن برپا کرد و در سپتامبر ۱۹۳۹ نخستین جورابها و مسواکهای نایلونی را در روزنامه‌ها تبلیغ کرد. آقای کراترز در سال ۱۹۳۷ مرد. هزینه‌های ساخت این فراورده به ۲۷ میلیون دلار بالغ شد، اما در یک سال ۶۴ میلیون جفت جوراب فروخته شد.

وقایع جهان به دنبال آن برای امریکاییها مساعد شد درحالی‌که ساخت این فراورده در آلمان، طی سالهای طولانی متوقف بود. چندین مؤسسه بزرگ اروپا، بویژه تراست انگلیسی ایمپریال کمیکال اینداستریز (ICI) که برای تولید نخهای نایلونی با شرکت کورتاد لیمیتد[1] شریک شده بود از دوپون اجازهٔ ساخت گرفت. در فرانسه، شیمیدانی با نام میشل ژنا[2] که در شرکت پچینی کار می‌کرد و همکاران وی توانستند بر پایهٔ اسید ریسینولئیک یک نوع نخ پولی‌آمیدی بسازند که با تحمل کراکینگ، اسید اون‌دسیلنی ($C_{۱۰}H_{۱۹} \cdot$ COOH undecylenique) می‌دهد که می‌تواند به آمینو اسید $H_۲N(CH_۲)_{۱۰}-COOH$ تبدیل شود. این جسم، همان ریلسان rilsan است که ساخت آن ده سال بعد شروع شد.

1. Courtaud Ltd 2. M.Genas

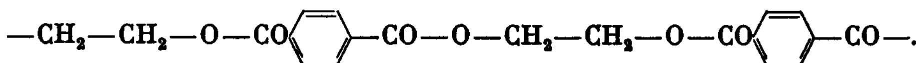
ساختار واقعی نایلون ۶۶ پس از اندک مدتی آشکار شد. نایلون را می‌توان به راههای گوناگون از ارزانترین مواد خام موجود در هر کشور تهیه کرد، بنابراین تهیهٔ آن بسیار با صرفه است. کاربرد نایلون یا مواد دیگر پولی‌آمیدی، عملاً در همه رشته‌های فنی و زندگی جاری است.

گسترش پس از جنگ: سومین دورهٔ تحول صنایع مواد سنتزی، که دورهٔ کنونی است، از سالهای ۵۰ شروع می‌شود. ویژگی این دوره، افزایش برق‌آسای تولید این فراورده‌ها در همه کشورهای صنعتی، پیدایش خانواده‌های تازهٔ بسپارها، و کاربرد مستقیم یک مادهٔ خام اولیه است.

گسترش این تولید، نتیجهٔ تلاش جنگی در تأسیس کارخانه‌های اولیه برای این فراورده‌های جدید بودند. موفقیت نایلون در میان مردم، پیش از آنکه ممالک متحدهٔ امریکا به جنگ کشیده شود تأمین شده بود؛ اما نیازهای تازه بسیار بیشتر از نیازهای مصرفی زمان صلح بود. کاربردها چنان بسرعت افزایش یافت که می‌توانستند این سالهای جنگی را بکلی نادیده بگیرند. برای همهٔ این مواد، وضع چنین بود. صلح بازگشته بود و صنعت امریکا که بسیار مجهز و آماده بود فراورده‌های خود را در همهٔ جهان سرازیر کرد و هاله‌ای از افسانه آن را در میان گرفت. کشورهایی که متحمل بیشترین زیانها شده بودند همگی در فکر نوسازی ظرفیتهای صنعتی خود با رجحان دادن به تولید مواد سنتزی بودند. صنایع دیگر آنها نیز از همین کوششها برخوردار بود و جملگی، مصرفی شده بودند.

پولی‌استرها: پیدایش خانواده‌های تازه‌ای از بسپارهای بالا مربوط به بعد از جنگ نیستند؛ اما چون اوضاع کلی، پشتیبان آنها بود، گسترش تولید آنها، چنان‌چه جنگ هم پیش نمی‌آمد، بسیار سریعتر انجام می‌گرفت.

پولی‌استرها، یا درست‌تر، دسته‌هایی از پولی‌استرها، در نیمهٔ دوم سالهای ۳۰ بخوبی بررسی شدند. امتیازات به ثبت رسیدهٔ اصلی، در سالهای ۴۴ تا ۵۰ بود و فراورده‌هایی از قبیل تریلن از ICI، در ۱۹۵۵، داکرون از دوپون در ۱۹۵۳ و فیلمها یا الیاف دیگر با نامهای بازرگانی گوناگون روانهٔ بازار شدند. آنها به‌طورکلی مشتقات یک دی اسید آلیلی، اسید تری‌فتالیک ترکیب شده با گلیکول هستند. شیمیدانها بدین‌ترتیب نوعی بسپارش را انجام دادند که بظاهر مثل بسپارش سازنده نایلون بود اما، نه از نوع پولی‌آمید:



فراورده‌هایی که از بسپارش ترفتالاتهای گلیکول به‌دست آمده‌اند خواصی مشابه پولی آمیدها دارند.

قابل توجه است که کارهای اولیهٔ پژوهشی در آزمایشگاه یک شرکت کوچک، با هزینه‌های کم انجام گرفته بود: دو شیمیدان انگلیسی با نامهای ج. ر. وینفیلد[1] و ج. ت. دیک‌سون با چند دستیار، اما هزینهٔ گسترش و صنعتی کردن آن تنها برای انگلستان به بیست میلیون پوند بالغ شد.

بررسی این نوع تراکم طبعاً شامل همهٔ امکانات کاربردی، پولی‌استرهای آلیفاتیک (خطی) بود که توسط کراترز، بیان و در سال ۱۹۴۲ بوسیلهٔ بایر «شبکه‌بندی» شده بودند، اما بویژه حدود سال ۱۹۵۰ با هم‌بسپار کردن آن با مشتقات اسید ایزوسیانیک $H-N=C=O$ بود که بعدها راه به‌سوی پلی‌اورتانها باز شد. پولی‌استرهای اشباع نشده، که با ترکیبات وینیلی هم‌بسپار شدند، در همان دوران دسته‌های دیگری از رزینها را تهیه کردند.

پولی‌اورتانها: پولی‌اورتانها هم در همان زمان مورد تحقیق بایر قرار گرفتند. آنها در اصل مشتقات اسید کربامیک $O=C\begin{smallmatrix}\diagup NH_2\\ \diagdown OH\end{smallmatrix}$ هستند که اوره، آمید آن است. اما بایر آنها را بروش تراکم استر ایزوسیانیک $O=C=N-(CH_2)_6-N=C=O$ مشتق از هگزامتیلن دی‌آمین، که آقای کراترز در موارد دیگری آن را به‌کار برده است، با گلیکول به‌دست آورد. در این مورد هم ما دربرابر یک خانوادهٔ بسیار پر ازدحامی قرار داریم که بر پایهٔ آن در سال ۱۹۴۷ کشپارهای سنتزی گوناگونی ساخته شدند.

پولی‌اتیلنها: یکی از خانواده‌های پربارآور بسپارها که در گذر سالهای ۵۰ افزایش یافته است، پولی‌اتیلنها می‌باشند. بررسی امکانات بسپارش اتیلن، در سالهای ۲۰ بدلیل اینکه آثاری روی واکنشهای شیمیایی با اعمال فشارهای زیاد داشته است وکاربرد آن در آن زمان با ساخت سنتزی آمونیاک اهمیت بسیار فراوان یافته بود، کار مستقلی شده بود. ده سال بعد، پس از گذشت مراحل متعدد، پژوهش دربارهٔ رفتار اتیلن در فشارهای بالا با رهبری چند شیمیدان ICI (ایمپریال کمیکال اینداستریز) انگلستان به پیش برده شد. در ۱۹۳۴ این گروه متعدد که زیر نظر آقایان ا. و. فاسیت[2] و ر. اُ. گیبسون و م. و. پرن[3] کار می‌کرد تصادفاً گرد سفیدی به‌دست آورد که بهترین کیفیت مورد انتظار از یک فراوردهٔ سنتزی ـ کشش، قالب‌گیری، پایداری در برابر عوامل شیمیایی و عایق بودن ـ را داشت. این گرد، بسپار بالایی بود که از اتصال زنجیری مولکولهای اتیلن، که در این تراکم، پیوندهای دوگانهٔ خود را از دست داده بودند: $-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$ ساخته شده بود. دو سر زنجیر ممکن بود برحسب روشی که برای ساخت به‌کار گرفته شده بود، ساختارهای مختلفی داشته باشند، و بر این اساس می‌توانستند زنجیرهای کوتاه یا بلند شاخه‌دار به‌دست آورند.

1. J.R.Whinfield 2. E.W.Fawcett 3. M.W.Perrin

هرچند که امتیازات این انگلیسی‌ها در سال ۱۹۳۷ به ثبت رسید، اما ساخت صنعتی آنها پس از پایان جنگ آغاز شد. در اساس، نخستین روشی که به‌کار گرفته شد، تولید نخستین بسپار در فشار ۳۰۰ اتمسفر بود. بسپارش دوم در ۲۰۰ اتمسفر انجام می‌گرفت و مقدار کمی اکسیژن به‌عنوان کاتالیزور به‌کار برده شد؛ دمای کار در حدود ۲۵۰ درجه بود.

راههای دیگری یافت شدند که به فشار بالا نیاز نبود. آقای کارل تسیگلر که در انستیتوی ماکس پلانک مولهایم[۱] تحقیق می‌کرد توانست نخستین بسپارش را با تثبیت روی کلرور آلومینیم به‌عنوان پایان کار، در فشار پایین عملی کند. هنوز بسپارهای پایینی بودند که تنها از دو یا سه مولکول اتیلن تشکیل می‌شدند. چهار سال بعد وی توانست با گروه خود با همین روش، بسپارهای بالای اتیلن را بسازد و در ۱۹۵۴ با همکاری جولیو ناتا[۲] ایتالیایی بسپارهای یک ردهٔ اتیلن، پروپیلن $CH_3-CH=CH_2$ را که متبلور شد، بسازند. این مادهٔ جدید، بسیار سخت و محکم بود.

در طی همین سالها، شیمیدانهای مؤسسهٔ فیلیپس پترولئوم در ممالک متحدهٔ امریکا که از اکسیدهای کروم به‌عنوان کاتالیزور استفاده کردند توانستند اتیلن و اولفینهای دیگری را در فشار ۵۰ اتمسفر، بسپار سازند. فراورده‌های به‌دست آمده، خصوصیاتی بسیار مشابه فراورده‌های تسیگلر داشتند. مؤسسات دیگر نفتی، نظیر استاندارد اوایل ایندیانا در سالهای ۱۹۵۵ ـ ۱۹۵۶ با بهره‌گیری از طبیعت کاتالیزورها (نیکل، کبالت، اکسیدهای تیتان و غیره) در فشار (۵۰ تا ۱۰۰ اتمسفر) و گرما، باز هم روشهای دیگری را به‌کار گرفتند.

در کار تولید پولی‌اتیلنها با تنها یک نوع مادهٔ خام، اتیلن یا همرده‌های بلافاصله بالاتر آن، توانستند با استفاده از واکنشهای پیش‌بینی شده و تغییر شرایط بسپارش، یک ردیف مواد جدید به‌دست آورند.

سیلیکونها: چندی نگذشت که شیمی سیلیسیم و ترکیبات آن با کمپلکسی فراوان به میدان آمدند و شباهتهایی با شیمی کربن از خود نشان داد. زمانی گمان می‌بردند که می‌توانند یک ترکیب آلی سیلیسی، نظیر R—Si—O را به یک کتون تشبیه کنند، اما این گمان بی‌درنگ کنار گذاشته شد. چندین شیمیدان سیلیکونها را بررسی کردند و توانستند ترکیبات ساده‌ای از آنها را توضیح دهند. بین سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۹۴۰، شیمی سیلیسیم به‌طور کامل در آزمایشگاه شناخته شد؛ توجه و تمرکز پژوهشهای همهٔ این شیمیدانها به این موضوع، صرفاً برحسب تصادف و به سایقهٔ کنجکاوی بود و اتفاقاً بسپارهایی از ترکیبات سیلیسیمی آلی، به‌طور غیرمنتظره به‌دست آمدند.

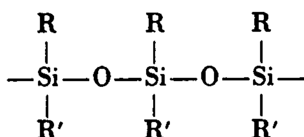
۱. Mülheim: شهری در قسمت رور، در مغرب آلمان.ـم.

2. G. Natta

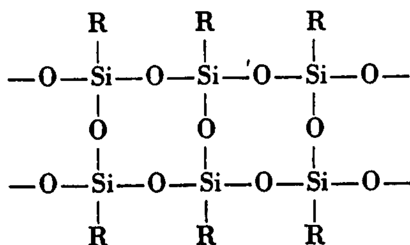
تحقیقات اولیه در سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۸۸۰ بوسیلهٔ آقایان شارل فریدل و جیمز میسن کرافتس، و نیز فریدل و آلبرت لادنبورگ[1] انجام گرفت. اما آقای ف. س. کیپینگ[2] امریکایی بود که با کار در این زمینه در سالهای ۱۸۸۹ تا ۱۹۱۴، هستهٔ اساسی دانش ساخت سیلیکونها را به‌دست داد. آقای کیپینگ بویژه در ۱۹۰۴ از واکنش گرینیار برای اجرای نخستین سنتزهای سیلیسیمی آلی استفاده کرد و آلکیل و آریل سیلوکسانها R_2SiCl_2 را به‌دست آورد که در هیدرولیز تولید سیلانولهای مربوطه $R_2Si(OH)_2$ را می‌دهند. این ترکیبات، پایه سیلیکونها هستند. و با داشتن گروههای هیدروکسیل $-OH$ در میعان، نخستین بسپار را می‌دهند.

در واقع این امکانات، فراوان هستند، زیرا R می‌تواند گروهی از ردیفهای خطی یا حلقوی باشد و می‌توان روی یک سیلیسیم، گروههای گوناگونی را وصل کرد، و نیز اگر یکی از آنها جای خود را به Cl بدهد، یک ترکیب پایه‌ای با سه OH- خواهیم داشت و بسپارش می‌تواند سه بعدی باشد.

چنانچه میعان پلکانی (پولی‌کندانساسیون) ترکیبی از نوع نخست، یک درشت‌مولکول خطی بدهد، می‌توان آن را چنین نمایش داد:



و برای نوع دوم شبکه‌ای به‌شکل زیر می‌دهد



در واقع پیکربندی این درشت‌مولکولها، بسیار پیچیده هستند.

این جنبه از شیمی ترکیبات سیلیسیمی آلی، تنها در ۱۹۴۱ به‌طور مشروح روشن شد. آقای کیپینگ که به تحقیقات خود تقریباً تا این تاریخ ادامه می‌داد، به آن علاقه‌مند نشد، هدف وی مشخص کردن ترکیبات ساده بود و زمانی‌که بسپارهایی به‌شکل چسبهای مایع به‌دست آورد از تحقیق چگونگی و مشخصات آن منصرف شد. اما گرچه آقای کیپینگ غرق در یک پژوهش اساسی

1. A.Ladenburg 2. F.S.Kipping

پربازده بود، جالب توجه است که هیچ‌یک از شیمیدانهای دیگری که به‌سوی تحقیق صنعتی روی آورده بودند کوششی برای پر کردن این جای خالی نکردند، آن هم در زمانی‌که تهیهٔ مواد سنتزی، آنچنانکه در گذشته شرح داده شد، گسترش زیاد یافته بود. در واقع، مواد خام مورد استفاده، از ترکیبات کربنی متعلق به شیمی آلی محض بودند و مشتقات سیلیسیم هنوز گویا آمادهٔ تبدیلاتی از این ردیف نبودند. وانگهی، روشهای تحقیق درشت‌مولکولها، به تازگی و پس از کارهای شتاودینگر و کراترز، بدرستی به‌کار گرفته می‌شد.

سرانجام بخاطر نیازهای صنعتی بسیار مشخصی، توجه به خواص در همجوشهای آلی سیلیسی شروع شد. شیشه‌گران و برقکاران به این نهضت تحقیق دودستی چسبیدند، نهضتی که تنها در آزمایشگاههای بسیار مجهز مؤسسات بزرگ می‌توانست به پیش رود. شروع کار، از ممالک متحدهٔ امریکا و در اواخر سالهای ۳۰ بود. مؤسسه امریکایی کورنینگ گلاوس ورکز یکی از شیمیدانها خود، آقای ج. ف. هاید[1] را مأمور تحقیق آن چیزی کرد که عادتاً به آن سیلیکون می‌گفتند تا اینکه بتواند از شفافیت آن برای ساخت جسمی محکمتر از شیشه‌های آلی ، با آمیختن آن با شیشه‌های معدنی استفاده کند. همچنین در نظر بود از خواص دی‌الکتریکی جالب توجه و نیز خاصیت آن در چسبندگی، برای تهیهٔ مواد عایق از نوع سیمهای شیشه‌ای، استفاده شود.

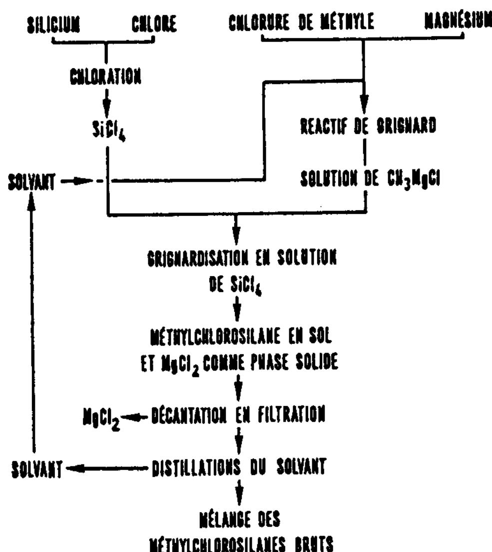
نتایج نخستین کارهای هاید، مورد توجه شرکت جنرال‌الکتریک قرار گرفت. این شرکت نیز بنوبهٔ خود، گروهی را زیر نظر آقایان و. ا. پاتنود[2] و ا. گ. روخو[3] مأمور این تحقیق کرد. در سال ۱۹۴۱ روشی برای سنتز مستقیم سیلیکونها به توسط روخو یافت شد. دراین‌روش سیلیسیم را مورد فعل و انفعال یک مشتق کلردار آلی در مجاورت مس قرار می‌دهند. مس در اینجا نقش کاتالیزور را دارد و کاربرد صنعتی آن آسانتر از استفاده از واکنش گرینیار است. بااین‌حال، روش استفاده از واکنش‌گر گرینیار باقی ماند.

در طی چند سال، نه‌تنها روشهای ساخت پیچیده‌ای به‌کار گرفته شدند و انواعی از سیلیکونها تهیه شدند، بلکه تحقیق منسجم مشخصات آنها نشان داد که با خانواده‌ای از فراورده‌ها سر و کار داریم که امکانات کاربرد آنها بسیار گسترده‌تر از کاربرد هر خانوادهٔ بزرگ دیگری است که شیمی صنعتی تا کنون آن را شناخته است.

گوناگونی بی‌نهایت پیکربندی و روابط بین گروه‌بندیهای آلی /سیلیسیم در این درشت‌مولکولها، نوعی حالتهای فیزیکی بدانها داده است که در روغنهای مایع دارای لزوجت، تا حالت کائوچویی و بالاخره جامد دیده می‌شوند. جالب‌ترین خواص فیزیکوشیمیایی آنها قدرت عایق برق و گرما

1. J.F.Hyde 2. W.I.Patnode 3. E.G.Rochow

جدول ۴. ردیف واکنشها برای تهیهٔ سیلیکونها.



بودن آنها، پایداری آنها دربرابر آثار جوی و شیمیایی، آب‌گریزی، ناچسبناکی و بالاخره پایداری آنها دربرابر گرماست. آنها را بر اساس ساختمان و حالت فیزیکی، برای کاربردهای حساس در ساخت مواد جنگی، از هر نوع: عایق، وولکانش پذیر، روانساز (یا رونواز)، ضدرطوبت و غیره برگزیدند. این همان چیزی است که تکنسین‌های امریکایی با علاقه آن را کشف کردند و به مجرد ورود امریکا به جنگ، این فراورده‌ها، که برای ساخت آنها مدتها و بی‌هدف حدود نیم سده تحقیق می‌کردند، یک‌باره در راه تولید صنعتی آن گام نهادند.

شرکتهای جنرال‌الکتریک، کورنینگ گلاس ورکز که در دورهٔ پایانی و تحقیقات تب‌آلود با یکدیگر شریک شده بودند یکی از بزرگترین مؤسسهٔ شیمیایی امریکا را با نام داوکمیکال کمپانی Dow Chemical Co تشکیل دادند و در سال ۱۹۴۲ شعبهٔ مشترکی را با نام داوکورنینگ کورپریشن Dow Corning Corporation تأسیس کردند تا نخستین تولید انبوه آن را تأمین کنند. در ۱۹۴۶ شرکت جنرال‌الکتریک با هزینهٔ خود به ساخت سیلیکونها دست زد، و در انگلستان نیز *ICI* و میدلند سیلیکانز Midland Silicones همین کار را کردند. پس از آن، طی ده سال،

تولید سیلیکونها در همهٔ کشورهای صنعتی جهان رایج شد.

زمینهٔ کاربرد مواد سنتزی: سرانجام، طی این دورهٔ سوم توسعهٔ صنعت مواد سنتزی، تحول دیگری پیش آمد. این تحول مربوط به منابع فراورده‌های پایه‌ای اکثریت بزرگ مواد بود. پیش از آغاز جنگ جهانی دوم در چند سال پس از پایان آن، نقطهٔ آغاز همانا ترکیب بسیار سادهٔ موجود، استیلن، بود که در گذشته دیدیم که تولید آن چگونه به مرحلهٔ صنعتی رسید. اما اتیلن را نمی‌توان ندیده گرفت، گرچه قابل مقایسه با استیلن نبود. بتدریج که تکنیکهای صنعت نفت در سالهای ۵۰ تحول می‌یافتند، این منابع فراوانتر می‌شدند. سرانجام استیلن جای خود را، به‌عنوان فراوردهٔ پایه‌ای این صنعت بزرگ سنتزی به اتیلن واگذاشت. کمی بعد خواهیم دید که این تحول چگونه انجام گرفت.

صنعت شیمی با گرایش از مواد خام مصنوعی به مواد سنتزی، بتدریج و بعد با جهشهایی در طی دودهٔ اخیر، سلطهٔ خود را بر همهٔ صنایع و نیز تأثیر خود را بر همهٔ جنبه‌های زندگی روزمره، گسترده ساخت.

در آغاز، این مواد جدید را به‌چشم فراورده‌های جانشین مواد سنتی می‌نگریستند. مواد سنتی در موقعیتهایی اقتصادی یا سیاسی ممکن بود کمیاب یا گران شوند، یا اینکه کیفیت آنها برای پاسخگویی به نیازهای بیان شده، گرچه تا کنون رضایتبخش بوده‌اند، نسبت به مواد جانشینی در مرحلهٔ پایینتری قرار می‌گیرند. این مطلب در مورد باکلیت صادق بود، زیرا رزینهای قالبگیری شده یا صفحات آن، خواص دی‌الکتریکی یا مکانیکی بسیار جالبی داشتند که مواد سنتی فاقد آن بودند، وانگهی هزینهٔ تولید و راه‌اندازی آن هم کمتر بود. اما این جنبه را می‌توان در موارد بسیاری نادیده انگاشت. مدتهای زیاد الیاف ریون از ابریشم گرانتر بود، اما منظره بسیار مواج و دلپذیری داشت و دیدیم که کائوچوی سنتزی اولیه، اغواکننده بود.

بااین‌حال، پس از گذشت سه دههٔ نخست از سدهٔ کنونی، معیار داوری تغییر یافت. موادی که صنعت شیمی آنها را بهتر کرده‌اند. بیشتر به مواد تکمیلی تبدیل شده‌اند تا مواد جانشینی. بعضی از آنها طبعاً مواد طبیعی را لااقل در زمینه‌های بسیار مشخصی حذف کرده‌اند. کاربرد گوتاپرکا در ساخت عایقهای برق، در اواخر سالهای ۲۰ کنار گذاشته شد. کشپارهای سنتزی را با کائوچوی طبیعی، برای بهتر کردن خواص آن، می‌آمیزند و چنین مخلوطهایی در جاهایی که صمغهای طبیعی از عهده وظایف محوله برنمی‌آیند به‌کار گرفته می‌شوند. برای استحکام تایرهای اتومبیلها و کامیونها، نخهای سنتزی به‌جای پنبه‌ای به‌کار گرفته شدند و . . . .

اگر رزینهای کلرور پولی‌وینیل برای جانشین صمغ لاکی، در ساخت و نیز پرسکاری

صفحات بسیار کوچک با شیارهای بسیار نزدیک هم، در آن زمان موجود نبود تولید صفحات پردوام گرامافون بوسیلهٔ پترگلدمارک[1] در سالهای ۱۹۴۵ ـ ۱۹۴۸ برای شعبه‌ای از Colombia Broadcasting System بدین خوبی انجام نمی‌گرفت. طبعاً پیشرفت در ضبط صدا و نیز پژوهش در ساخت بازویی بسیار سبک برای نگاهداری سوزن، مستلزم تکنیکهای دیگری بود که بسیاری از آنها از فراورده‌های صنایع شیمیایی کمک گرفته‌اند.

ما بر سر آن نیستیم که مراحل تحولی تکنیکهای گوناگون کاربردی را، تنها تحت تأثیر تهیه کردن مواد مصنوعی و سنتزی در زمینهٔ آنها بدانیم. پس از فن عکسبرداری که بی‌شبهه نخستین زمینهٔ کاربرد این مواد است، صنایع برق نیز یکی از اولین و مهمترین استفاده‌کنندگان از این مواد بوده است و بعدها، بلافاصله پس از پایان جنگ جهانی اول، ساخت هواپیماها و اتومبیلها، تکنیکهای بسته‌بندی و تزیین، اپتیک عمومی و اپتیک دقیق، مکانیک، تجهیزات شیمیایی، وسایل اتاق جراحی، پیاپی و حتی گاهی در یک زمان، دهه به دهه از گروههای کاربردهای پیوسته جدید بوده‌اند.

دستاوردها در نساجی: دراین‌باره شمارش صرف این دستاوردها کافی نیست. بهتر است دستاوردهایی را هم که در زمینهٔ الیاف بافندگی بوده‌اند بیدرنگ به‌حساب آوریم. شمار زیادی از موادی که با کارهای شیمیایی بهتر شده‌اند می‌توانند در اثر گرم کردن، محلول یا ذوب شوند و از سوراخهای نخریز مدرجی بگذرند و به نخ تبدیل شوند. طبعاً تکنیکهای گوناگون کاری، پس از پیدایش نخستین الیاف سلولوزی برای انجام ریسندگی، کشش، شست‌وشو و غیره، بمنظور تهیهٔ انواع فراورده‌های مطلوب، پدید آمدند. وانگهی ساخت مواد تازه از راه هم‌بسپار بمنظور افزایش گوناگونی انواع بسپارهای رایج، آغاز شد.

در کار ساخت بعضی الیاف طبیعی، مانند پنبه و کتان توانستند مثلاً در سایهٔ اختراع روش چروک‌ناپذیرسازی ـ که دستاورد پژوهش دراز مدتی بود که از سال ۱۹۱۸ تا ۱۹۳۲ با سماجت به‌وسیله گروه کوچکی از پژوهندگان، در استخدام شرکت انگلیسی Tootal Broadhurst Lee با مدیریت آقای سر کنت لی[2]، پیگیری شد ـ موفقیتهایی در بهتر شدن کیفیت آنها پدید آورد. این روش صنعتی شده، شامل آغشته کردن نخها با موادی است که در جریان نوعی عملیات حرارتی، تشکیل رزینی روی خود نخ می‌دهند. علاوه بر نخ طبیعی، نخ مصنوعی یا سنتزی نیز می‌تواند از این روش بهره گیرد.

این نخها باید کوتاه باشند که از دستگاه ریسندگی مانند نخهای طبیعی بگذرند. نخستین هدف همهٔ پژوهندگان ساخت نخهای شیمیایی، به‌دست آوردن نخ طویل با گذرانیدن مایع دارای لزوجت

1. Peter Goldmark 2. Kenneth Lee

از دستگاه نخ‌ریز بود. اما در آن زمان که هنوز تنها نخهای سلولوزی را می‌شناختند، مقداری نخهای ردّی باقی می‌ماند که بزودی اندیشیدند که با ریسیدن آنها با وسایل ریسندگی معمولی، آنها را مورد استفاده قرار دهند. سپس طی جنگ جهانی اول، برای جبران کمبود الیاف طبیعی، بویژه پشمی، کاربرد الیاف کوتاه شیمیایی را که با قیچی کردن الیاف بلند به‌دست آمده بودند، سیستماتیک کردند. نخستین امتیازهای به ثبت رسیده، تاریخهای ۱۹۱۱ و ۱۹۱۳ را دارند؛ اما در سالهای ۲۰ بود که خامهٔ سلولوزی به‌مقدار فراوان وارد بازار شد. این قیچی کردن نخها به الیاف کوتاه و عمل آوردن آنها، در همهٔ فراورده‌هایی که بعداً ساخته شدند تکرار شد.

بدین‌ترتیب، صنعت نساجی بسرعت هم از لحاظ تعداد و هم از جنبهٔ گوناگونی مواد خام، گسترش یافت و علاوه بر آن، مخلوط نخهای طبیعی و غیرطبیعی به این صنعت امکان داد که هرگونه کیفیت مطلوب مکانیکی و بافندگی نخهای ریسیده، تقریباً به‌طور کامل، به‌دست آید. الیاف طبیعی، که هرگز از دور خارج نشدند، مقام خود را در صنعت پوشاک، مثلاً برای رفع نیازهای مربوط به کیفیت پارچه‌ها حفظ کردند. با کاربرد نسبتی از الیاف شیمیایی، کیفیت آنها بهتر می‌شد. پس از جنگ جهانی دوم بود که کاربرد تار بریده staple بسرعت تعمیم یافت.

نابافته‌ها: در این زمان فراورده‌ای از نوع دیگر، «نابافته» به بازار آمد و کاربرد آن، در طی سالهای ۵۰ در ممالک متحدهٔ امریکا و در دهه‌های بعدی در قاره‌های دیگر، گسترش یافت. در اینجا هم در برابر ما امکانات فنی بسیار زیادی قرار دارند. این امکانات، نخست مربوط به طبیعت الیاف کار شده، نه‌تنها طبیعت شیمیایی، بلکه ابعاد آنها می‌باشند: الیاف کوتاه به طول سه میلیمتر یا تار بریده که چهار تا شش سانتیمتر طول دارند. باز این امکانات مربوط به‌ترتیب الیاف، پس از پراکندگی آنها، یعنی وضع فتیله است. پژوهش در این زمینه، بویژه روی این مسایل و نیز روی وسایل فیزیکی مربوط به فتیله سازی، گردش هوا یا جریان آب، تمرکز داشت.

تکنسین‌ها به سائقهٔ کنجکاوی در تحول، خواستند فتیله را با رشته‌های پیوسته انجام دهند که خود ساختار فتیله می‌توانست به دل‌خواه، تحت تأثیر بعضی عوامل فیزیکی در زمان ریسندگی، آماده شود. در واقع، در اینجا ما به پایان یک خط طویل پژوهش رسیده‌ایم که ریشه‌های آن به آغاز سده برمی‌گردد ـ خطی که در جریان دهه‌های پس از جنگ دوم به‌کار بردهای صنعتی منجر شدند. تهیهٔ الیاف، مثلاً تارچه‌ای، که با روزنرانی جرم مذاب یا محلول، طبق روشی که آقای کراترز در ۱۹۳۸ مطرح کرده است، برای ساختن فتیله‌های نابافته گسترش یافت. کاربرد چسبهای شیمیایی، افزایش الیاف ترموپلاستیک (گرمانرم) یا عمل آوردن مکانیکی بمنظور تأمین استحکام فتیله‌ها نیز

باید پیاپی رواج گرفته باشند.

سرانجام، روشهای ساخت چنان گوناگون شدند که نابافته‌ها در ساخت ماهوت، چرمهای مصنوعی، پارچه‌های پوشاکی (آستریها و فراورده‌های ذوب چسبنده با اطو)، قواره‌هایی برای صافی در صنعت، کاغذهای سنتزی، فراورده‌های بسته‌بندی و غیره به‌کار گرفته شدند.

این چند عمل کلی مربوط به تحول صنعت نساجی تحت تأثیر نفوذ مواد شیمیایی را کارهای کوچک دیگری در تحول این مواد، تکمیل کرده‌اند. نظر این بود که این مواد شناخته شده را درکار الیاف تازه یا اختلاط تازه‌ای از الیاف به‌کار گیرند. بدین‌ترتیب ناچار از ایجاد مواد جدیدی برای اجرای کارهای تازه، تهیهٔ فتیله‌های منظم از طریق روزنرانی و غیره بودند. چنانچه این مجموعه وسایل و امکانات را در همهٔ زمینه‌های صنعتی، که مواد مصنوعی و سنتزی در آنها راه یافته‌اند وارد کنیم، می‌توان تصوری از مقدار تأثیر صنعت شیمی معاصر در تحول همهٔ روشهای تولید صنعتی به‌دست‌آورد.

مهندسی شیمی

تغییر شکل ساختار صنعت شیمی کلاسیک، چنانکه در دههٔ نخست این سده بود، به ساختار مهندسی شیمی، بتدریج و متناسب با پیشرفت رشته‌های تازه‌ای انجام گرفت که پیدایش و تکامل آنها را دیدیم. اما بخش دیگری از صنعت شیمی نیز در این تغییر شکل سهیم بود، و آن شیمی صنعت نفت است که معمولاً و بنادرست آن را پتروشیمی (= شیمی سنگ) می‌خوانند، درحالی‌که باید پترولئوشیمی گفت.

پژوهش دربارهٔ هیدروژندهی: این پژوهش دقیقاً با آغاز این سده شروع شد. نخستین مراحل آن را با تاریخ نخستین تقطیر صنعتی نفت (صفحات ۶۴۰ تا ۶۴۲) دیدیم. آنچه که در اینجا باید تأکید کنیم مسأله شعبات پژوهشهای آزمایشگاهی دربارهٔ هیدروکربنهاست که زمانی پدید آمد که شروع به استفاده از هیدروکربنها به‌عنوان سوخت در موتورهای احتراقی شد. اما در تحقق این روش مهم عوامل دیگری هم مؤثر بودند که اولین آنها پراتیک سنتز صنعتی آمونیاک بر پایه نیتروژن و هیدروژن بود. این کار در واقع بخش بزرگش بر پایهٔ واکنشهای هیدروژندهی بود که نخست، تکنیکهای مهم این صنعت تازه را پی‌ریزی کردند: هیدروژندهی به اکسید کربن، هیدروژندهی زغال‌سنگ در اول و سپس هیدروژندهی هیدروکربنها، بعداً. اما بعدها در پایان سالهای ۳۰، واکنشهای هیدروژن‌زدایی بود که برای تهیهٔ مواد خام این صنعت بزرگ، اهمیتی خاص یافت.

گاه‌شماری تحولات صنعت شیمی در این زمینه طی نیم سدهٔ ۱۹۱۰ ـ ۱۹۶۰، کار بسیار

دشواری است. صنعتی که یکی از بخشهای بسیار مهم اقتصاد سراسر جهان را تشکیل می‌دهد.

شاید پایهٔ این جنبش بزرگ را بتوان بر پژوهشهای آزمایشگاهی قرار داد، که به‌نظر نمی‌رسد کاربردهای صنعتی یافته باشند. یکی از کهنترین آنها جزء کارهای برتلو دربارهٔ سنتزهای بنیانی ترکیبات آلی بوده است: استیلن، الکل اتیلیک، اسید استیک و غیره. آقایان پل و آرنو (پسر و نوهٔ آقای تنار شیمیدان)، نخستین کسانی بودند که در سال ۱۸۷۳ با قرار دادن مخلوطی از هیدروژن و اکسید کربن تحت تأثیر تخلیه‌های برقی، یک مایع روغنی به‌دست آوردند. سی سال بعد آقایان پل ساباتیه و ژان باتیست ساندرن[1] برای نخستین بار، هیدرورندهی کاتالیزوری اکسید کربن و انیدرید کربنیک و نیز تبدیل آنها به متان را عملی کردند. کاتالیزورگر این عمل، نیکل و دمای کار حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه بود.

امتیازهای متعددی در سالهای بعد در مورد ساخت متان از طرف ساباتیه و ساندرن در سال ۱۹۰۵ و نیز از سوی شیمیدانهای انگلیس و آلمان به ثبت رسیدند، اما هرگز مورد استفاده قرار نگرفتند. مانع اصلی این کار، دشواری خالص کردن گاز آب بود.

در طی این دهه‌ها، ترکیب نفتهای حوضه‌های مختلف رفته رفته بخوبی شناخته شد، اما باز هم دربارهٔ نوع و درصد هیدروکربنهای آن شک و تردیدهایی باقی ماند، بدون آنکه از سازاهای دیگری که در این مخلوط بسیار متنوع وجود دارند سخن بگوییم. وانگهی، کوشیدند تا از راههای تجربی، هیدروکربنهای با وزن مولکولی زیاد را از نو بسازند ـ کاری که تنها برای اثبات یا رد نظراتی دربارهٔ پیدایش نفت انجام می‌گرفت.

ساباتیه و ساندرن با گسترش هیدروژندهی به استیلن و استفاده از نیکل به‌عنوان کاتالیزور در سال ۱۹۰۵ یک ردیف هیدروکربنها را تا حد فراورده‌های مایع و نیز فراورده‌های تراکم استیلن به کربورهای آروماتیک به‌دست آوردند ـ کاری که در آن زمان سنتز نفت خوانده می‌شد. آقای ولادیمیر ن. ایپاتیف شیمیدان روس که در شیکاگو کار می‌کرد، بنوبهٔ خود «سنتز» نفت را با بسپارش اتیلن در دماهای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه، بدون کاربرد کاتالیزور، در سال پس از آن عملی کرد. ایپاتیف در این زمان به‌مناسبت اینکه در سالهای ۱۸۹۲ ـ ۱۸۹۶ روشی برای سنتز ایزوپرن (کربور اشباع نشده‌ای که در آن زمان می‌دانستند که ترکیب اساسی کائوچو می‌باشد) پیشنهاد کرد مشهور شده بود.

پژوهشهای دیگر وی در مجاورت کاتالیزور و در فشار انجام گرفته بودند. وی از فشارهای ۵۰۰ اتمسفر و بیشتر استفاده می‌کرد. در این دوره چنین روشهایی، با بدبینی تلقی می‌شد و بویژه ساباتیه بدانها اعتقاد نداشت زیرا از «هیپرپرسیون» برای سنتز آمونیاک استفاده شده بود. آقای

1. J-B.Senderens

ایپاتیف همچنین از نخستین شیمیدانانی بود که کاتالیزور هتروژن و فعالیت کاتالیزوری شمار زیادی از ترکیبات معدنی مخصوصاً اکسیدهای فلزی را بررسی کرده بود.

او در جریان کارهای خود یک ردیف تمام از هیدروکربنها را به‌دست آورد. سپس به‌کار بسپارش گازهای کراکینگ روی آورد. یکی از کاتالیزورهای مورد استفادهٔ وی، اسید فسفریک بود که بعداً در سال ۱۹۲۷ در آلمان برای همین منظور به‌کار گرفته شد.

از مشخصات سالهای پیش از جنگ جهانی اول، انجام پژوهشهای مربوط به گسترش روشهای هیدروژندهی جهت سنتز آمونیاک با مواد دیگری جز نیتروژن بویژه با زغال‌سنگ، لینیت، روغنها و قطران است. آقای فریدریش برگیوس[1]، شیمیدان آلمانی، نظریهٔ این روش را بیان داشت و در ۱۹۱۳ نخستین امتیازها را به نام خود به ثبت داد. تهیهٔ هیدروکربنها با این روش، نتیجهٔ کارهایی است که برگیوس مدت چند سال برای تعیین منشأ زغال‌سنگ و نفت انجام داده بود. اما روشهایی که وی به‌ثبت رسانیده بود تا سالهای ۱۹۲۴ ـ ۱۹۲۶، یعنی زمانی‌که آقای پیر[2] مولیبدن و تنگستن را به‌عنوان کاتالیزور به‌کار گرفت و جریان عملیات به یک فاز مایع و سپس فاز بخار تقسیم شد، نمی‌توانستند در صنعت به‌کار روند. برگیوس در ۱۹۲۵ حقوق همه امتیازات خود را به BASF فروخت.

در سال ۱۹۱۳، باز هم BASF، اختراعاتی را برای هیدروژندهی به اکسید کربن به ثبت رسانید، در این زمان، امکان تهیهٔ شمار زیادی ترکیبهای شیمیایی از آن را پیش‌بینی می‌کردند و بزرگترین دشواری کار این بود که نمی‌دانستند که آیا امکان هدایت مناسب واکنش برای تهیهٔ فراورده‌های معین و پرهیز از تشکیل مخلوطهای هیدروکربن و ترکیبات اکسیژنداری که جدا کردن آنها در محدودهٔ اقتصادی غیرممکن است، وجود دارد یا خیر؟

دوران مخاصمات و سالهای بلافاصله پس از جنگ، کاربرد آنچه را که وجودش لازم می‌نمود به عقب انداخت. دیده شد که کوششهای شیمیدانهای آلمان، متوجه راه‌اندازی ساخت آمونیاک سنتزی و اسید نیتریک شد. پژوهشهایی که به تازگی راه‌به‌جایی برده بودند در سال ۱۹۲۲ باکوشش بیشتر به پیش کشیده شدند و میدان کاربرد آنها در بیست سال بعد چنان گسترده شد که در یک زمان در جهات مختلف توسعه یافت.

روش سنتز: از میان فراورده‌های هیدروژندهی به اکسید کربن، یکی هم متانول، CH_3OH، ساده‌ترین همه الکلهاست. تا آن زمان این الکل را از تقطیر چوب در ظروف دربسته به‌دست می‌آوردند، و مادهٔ خام مهمی برای صنعت شیمیایی به‌شمار می‌رفت. ردیفی از اختراعات BASF

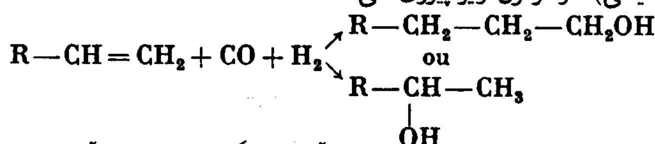
1. F.Bergius 2. Pier

که در ۱۹۲۳ و ۱۹۲۴ به ثبت رسیدند شامل ساخت سنتزی متانول بر پایهٔ گاز آب که در فشار انجام شده است و کاربرد همه کاتالیزورهای ممکن در دماهای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه بود. در گروههای زیادی که برای ساخت این ماده کار می‌کردند، آقای الوین میتاش هم بود که در عملی کردن سنتزهای نیتروژن شرکت کرده بود. این مؤسسه آلمانی در سایهٔ تجربیاتی که به‌دست آورده بود توانست تولید متانول خالص را تقریباً بیدرنگ شروع کند. در برههٔ بین دو جنگ جهانی در آلمان برای برپا کردن چندین واحد تولید این ترکیب، کوشش خاصی به‌عمل آمد. کارخانه‌هایی که فعلاً در آلمان غربی قرار دارند ۱۸۰۰۰ تن متانول در ۱۹۲۸ و ۱۲۸۰۰۰ تن در ۱۹۴۴ تولید داشتند. در فرانسه، نخستین تولید متانول سنتزی، کمی پس از آلمان، درکارخانهٔ شرکت کولمن واقع در بتون[1]، بر پایهٔ کارهای ژ. پاتار عملی شد که بویژه اثر اکسید روی و مس را به‌عنوان کاتالیزور تحقیق کرده بود.

حلال صنعتی، ضدیخ، مضاف به سوختها و پروپرگولها، نقطهٔ آغازی برای تهیهٔ آلدئید فورمیک، اسید استیک، کلرور استات متیل، متانول، پایهٔ شمار مهمی از ساختهای بزرگ است.

در زمانی‌که سنتز متانول توسعه می‌یافت، درصدد برآمدند تا از همین اصول برای ساخت فراورده‌های بالاتر استفاده کنند، اما تنها نتایجی که برای صنعت داشت، مواد مربوط به ساخت الکل ایزوبوتیلیک بود. $\begin{matrix} CH_3 \\ CH_3 \end{matrix}\!\!>CH-CH_2OH$ امتیازهای اولیه در سال ۱۹۲۳ بوسیلهٔ BASF به ثبت رسیدند. این الکل، مصرف صنعتی فراوان داشت؛ اما برای آلمان، سود آن در امکان تبدیل به ایزوبوتیلن جهت ساخت کائوچوی سنتزی بود.

وانگهی این روش ساخت الکل ایزوبوتیلیک، سودمندی خود را طی سالهای پنجاه از دست داده بود، درحالی‌که روش تهیهٔ الکلهای ردیف بالا، در نتیجهٔ تأثیر اکسید کربن و هیدروژن بر اولفینها (کربورهای دارای پیوند اتیلنی)، از فرمول زیر پیروی می‌کند:

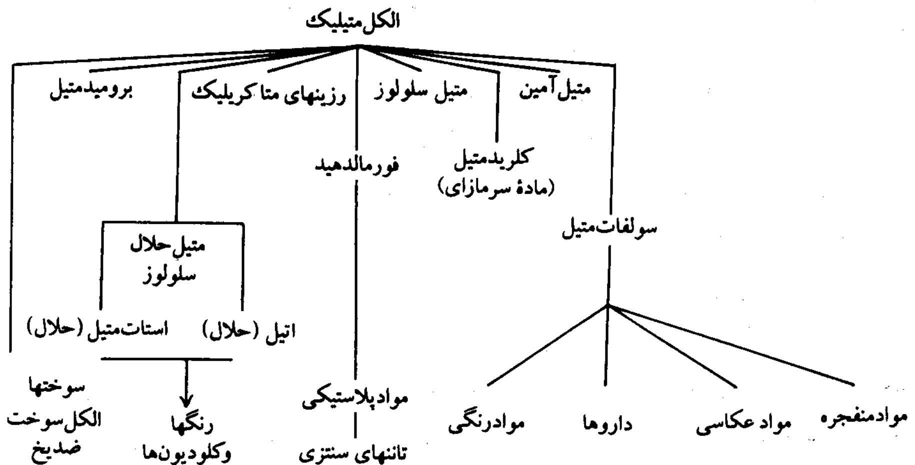


$$R-CH=CH_2+CO+H_2 \rightarrow \begin{cases} R-CH_2-CH_2-CH_2OH \\ \text{ou} \\ R-\underset{\displaystyle OH}{\underset{|}{CH}}-CH_3 \end{cases}$$

این نوع واکنش به‌اصطلاح اوکسو oxo کمی پیش از آغاز جنگ دوم بوسیلهٔ آقای رولن[2] شیمیدان آلمانی برای یکی از مؤسسات مبتکر در سنتز متانول، Ruhrchemie AG بررسی شده بود. این روش در جریان جنگ برای تولید الکلهای چرب به منظور ساخت مواد پاک‌ساز، تکمیل شد. اما شرایط اقتصادی پس از جنگ امکان کاربرد آن را در آلمان نداد و حال‌آنکه ممالک متحدهٔ امریکا و انگلستان که کربورهای اتیلنی را بسیار آسان به‌دست می‌آوردند، آن را

1. Bethune 2. Roelen

جدول ۵.کاربردهای الکل متیلیک در صنعت الکل متیلیک



عملی ساختند. بدین علت بود که الکلهای بالا و مشتقات آنها، که تا آن زمان نسبتاً کمیاب بودند، به فراوانی روانهٔ بازار شدند.

این نمونه نشان می‌دهد که تکنیکهای شیمی صنعتی پس از جنگ جهانی دوم، تا چه اندازه در تحول انعطاف یافته بودند.

سنتز فیشر-تروپش: آقای میتاش که در سنتز آمونیاک، نقش داشته است، کمی بعد به‌اتفاق آقای شنایدر با تحت تأثیر قرار دادن گاز آب به کاتالیزورهایی که از اوسمیم و کبالت ساخته شده بودند، همراه با فشار و گرما، هیدروکربنهایی با کربن بالا، تهیه کرد. این دستاورد، پس از سنتزکردن متانول با همکاری آقایان پیر و ک. وینکلر بود. در همین زمان آقای فرانتس فیشر که او نیز به این پژوهش دلبسته بود، تهیه هیدروکربنها را ادامه داد. وی همراه با همکارش تروپش در ۱۹۲۱ در انستیتوی کایزر ویلهلم (بعدها به انستیتوی ماکس پلانک تغییر نام داد) واقع در مولهایم نخست سینتول را ساخت.

فراورده‌ای که با این نام ساخته شد، آمیزه‌ای از ترکیبات اکسیژندار و همرده‌های آلیفاتیک، اسیدها، الکلها، ستونها، آلدئیدها بود. واکنش مخلوط اکسیدکربن هیدروژن در دمای ۴۰۰ درجه و

۱۰۰ اتمسفر فشار در مجاورت کاتالیزور انجام می‌گرفت. synthol که باز هم در فشار گرم می‌شد به synthin آمیزهٔ هیدروکربنهایی که بی‌درنگ به‌عنوان سوخت به‌کار گرفته شد، تبدیل شد.

فیشر و تروپش به مدت چند سال بررسی این تبدیلات را ادامه دادند. آنها ثابت کردند که چنانچه فشار واکنش را پایین آوریم درصد هیدروکربنهای تشکیل شده در برابر درصد ترکیبات اکسیژندار بالا می‌رود.

سرانجام در ۱۹۲۵ که کاتالیز خود را تکمیل کرده بودند توانستند سنتز هیدروکربنهای بالا را در دمای نسبتاً پایین ۲۰۰ ـ ۲۵۰ و فشار اتمسفر، انجام دهند. اما برای اینکه به راه‌اندازی روش فیشر ـ تروپش و تهیهٔ طرح واحدهای تولید آن اطمینان حاصل شود لازم بود که حدود ده سال دیگر بگذرد. نخستین واحد تولید آنها در آوریل ۱۹۳۶ راه افتاد و پیش از پایان همین سال سه واحد دیگر آماده شدند و با یک ضربه، ظرفیت تولید اولیهٔ نفت سنتزی به ۲۰۰۰۰۰ تن در سال رسید. این کوششها هم برای اصلاح روشها و هم بمنظور افزودن تجهیزات با سرسختی پیگیری شد. خود این روش پیوسته متحول می‌شد. در ۱۹۴۴ پس از یک مبادلهٔ اطلاعات بین کارخانه‌های آلمان، توانستند این واکنش را در فشاری متوسط و در مجاورت کاتالیزور «آهن» (چون کبالت بسیار کمیاب شده بود) انجام دهند. تعداد این کارخانه‌ها به رقم نه رسید و ظرفیت تولید آنها، چنانچه شش کارخانه در اثر خرابی، تعطیل نمی‌شدند، در سال به ۷۴۰۰۰۰ تن بالغ می‌شد. تولید واقعی آنها در ۱۹۴۲ برابر ۵۵۲۰۰۰ تن بود که در ۱۹۴۴ به کمتر از ۲۷۹۰۰۰ تن رسید.

دیده می‌شود که سنتز متانول و سنتز هیدروکربنها بر اساس گاز آب، که مخلوطی از اکسید کربن و هیدروژن است، لااقل در اصول به یکدیگر نزدیک هستند. ممالک متحدهٔ امریکا کمی پیش از سال ۱۹۳۰ به سنتز متانول علاقه‌مند شد و پس از جنگ جهانی دوم بروش گاز آب نخستین کارخانه در ۱۹۴۹ گشایش یافت. کشورهای دیگر کمی پیش از این مملکت، به هر دو سنتز روی آورده بودند.

هدف سنتز نخست که تهیهٔ سوختهای سنتزی بود بعدها اولویت خود را از دست داد؛ اما سنتز فیشر ـ تروپش با اصلاحاتی که در آن شد بر تحول صنعت شیمی اثر مهمی گذاشت: این سنتز منبعی برای شمار زیادی از فراورده‌های واسطه‌ای شد که پس از جداسازی و عمل آوردن آنها در رأس فهرست این مواد جای داده شدند. این فرصتی برای پیشرفت فن کاربرد کاتالیزورها بود ـ چیزی که به سود تکثیر روشهای کراکینگ و رفورمینگ هیدروکربنهای طبیعی تمام شد. سرانجام این کار، ارزیابی مجدد اهمیت شماری فراورده‌های استخراجی زغال‌سنگ، لینیت، تورب

مشخصهٔ گروههای معین را نشان می‌دهد، مثلاً ۱/۵۴Å برای پیوند میان دو کربن راست زنجیر، و ۱/۴۲Å را میان دو کربن و زنجیر حلقوی، و ۱/۳۲Å را برای پیوند اتیلنی، ۱/۱۹Å برای پیوند استیلنی و غیره*.

در اواخر سالهای ۳۰، مجموعهٔ جالبی از روشهای فیزیکی در دسترس دانشمندان شیمی آلی قرار گرفت که در آن زمان برای اجرای سنتز اجسام تازه‌ای تلاش می‌کردند و نیز همان‌طور که دیدیم، انواع و اقسام واکنشهای شیمیایی بسیار انعطاف‌پذیر در اختیار آنان بود.

نخستین نزدیکی به مواد سنتزی: می‌توان تقریباً سه دوره را در پیدایش صنعت مواد سنتزی تشخیص داد. از آغاز این سده تا پایان جنگ جهانی اول، چند اقدام اولیه و محدود در فضای آزمایشگاهی انجام گرفت.

آقای اوتو رُم[1] از سال ۱۹۰۰ بررسی ترکیبات آکریلیک و متاکریلیکی را که از اسیدهای مربوطه $CH_2=CH-COOH$ و $CH_2=C(CH_3)-COOH$ یا از نیتریلها مشتق می‌شوند آغاز کرد. وی شاهد پدیده‌های بسپارشی بود که این ترکیبات ایجاد می‌کنند. اما سی سال پس از این تاریخ، یعنی در دورهٔ دوم بود که صنعتی شدن ساخت این بسپارها، همزمان در انگلستان، ممالک متحدهٔ امریکا و آلمان عملی شد.

آقای اسمیت در سال ۱۹۰۱ با استری کردن اسید فتالیک $C_6H_4(COOH)_2$ یا با انیدرید این اسید به کمک گلیسرین، نخستین ترکیب گلیسروفتالات را ساخت. این اسید در آن زمان، فراوردهٔ واسطه‌ای ساختِ اندیگو بود. بررسی این استری کردن، راه را در سال ۱۹۲۷ برای تهیهٔ روغن خشکانه (سیکاتیف) مصنوعی، و نیز بسپارش آنها، که در ساخت رنگ کاربرد دارد، باز کرد.

بسپارهای کلوئیدهای وینیل $CH_2=CHCl$ و دیگر ترکیبات وینیلی، مثلاً استات وینیل و وینیل بنزن یا استیرولن (استیرن) $CH_2=CH-C_6H_5$ موضوع تحقیقات آقای کلاته[2] در سالهای ۱۹۱۲ ـ ۱۹۱۴ بود. طی جنگ جهانی اول، همین شخص در آلمان ساخت کلر استات پولی وینیل را که بعدها بنفع استات کنار گذاشته شد، شروع کرد.

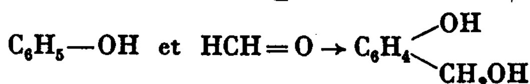
این دورهٔ اول با تولید نخستین کائوچوی سنتزی هوفمان، که دربارهٔ آن سخن گفته‌ایم، نیز مشخص می‌شود.

---

*. یادآوری می‌شود که Å یا آنگستروم برابر یک‌دهم میلیونیم یک میلیمتر است.ـم.

1. O.Rohm 2. Klatte

بسپارشهای صنعتی: دورهٔ دوم اوایل سالهای ۳۰ آغاز می‌شود، گرچه واقعاً در ادامهٔ کوششهای دانشمندانی از شیمی آلی که برای صنعت کار می‌کردند گسستگی وجود نداشته است. در واقع در طی این تأخیر آشکار انتقال بود که در سایهٔ پژوهشهای شتاودینگر و گروه وی، نیز تعداد زیادی شیمیدانها و فیزیکدانانی که بویژه در آلمان و امریکا کار می‌کردند دربارهٔ ساختار درشت‌مولکولها، که قبلاً ذکر آنها رفت، آگاهیهای تازه‌ای به‌دست آمد. سالهای ۳۰ با آغاز تولید صنعتی بسپارهای بزرگ یا هم‌بسپار (کوپولیمر)های سنتزی مشخص می‌شود. در همین سالهاست که روشهای گوناگون بسپارش قابل استفاده در مقیاس صنعتی کشف شدند. در حقیقت این مشکل روز بود، مشکل انتقال سنتز درشت‌مولکولها از آزمایشگاه به کارخانه. گرچه به فهم مکانیسمهای شیمیایی بسپارش: پیوند عامل به عامل(مثلاً عامل آمین به عامل اسید، چیزی که آقای والاس هیوم کراترز[1] بعدها آن را بررسی کرد)، میعان و تراکم همراه با حذف آب از نوع:



$$C_6H_5-OH \quad et \quad HCH=O \rightarrow C_6H_4\begin{matrix} OH \\ CH_2OH \end{matrix}$$

که اکنون به‌طور تجربی، صنعتی شده است، یا بسپارشهایی از راه افزایش روی پیوند اتیلنی، که در آنها شاهراهی به‌سوی یک کاتالوگ غول‌پیکر از فراورده‌های تجارتی باز شد، دست یافته بودند کاربرد این فرایندها در صنعت، مستلزم اصلاح شماری از روشهای کلی بود که هر یک از آنها در ردیفهایی از ترکیبات واسطه‌ای کاربرد داشتند. تقریباً طی ۲۰ سال میان ۱۹۳۰ ـ ۱۹۵۰ این تکنیکها بررسی و روبه‌راه شدند، اما این بدان معنی نیست که این تکنیکها بعدها دستخوش تحول نشده‌اند.

مشکل کار، تعیین محیط و شرایط فیزیکوشیمیایی بود که بسپارشها باید در هر مورد برای رسیدن به بهترین بازده، چه کمی و چه کیفی، واجد آنها باشند. در واقع، با درجهٔ مورد نظر بسپارش، که با این یا آن روش کلی موجود به‌دست می‌آمد، روش تولید عبارت خواهد بود از راه امولسیون در واکنشگاه (رآکتور)ها و حضور بعضی کاتالیزورها، یا راه محلول کردن تکپار (مونومر) با رسوب دادن بسپار.

بسپارهای وینیلی: با استفاده از فرایند تعلیق در امولسیون بود که بسپارهای وینیلی که بیست سال پیش بوسیلهٔ آقای کلاته بررسی شده بودند برای نخستین بار تهیه شدند. مهمترین این بسپارها، ترکیبات آکریلیکی و متاکریلیکی هستند که مؤسسه آقای اوتو رُم و همکارش آقای هاس در آلمان در سال ۱۹۲۷ ترکیبات نخستین و در سال ۱۹۳۵ ـ ۱۹۳۶ ترکیبات متاکریلیکی را ساختند. ساخت ترکیبات پلی‌متاکریلات صنعتی در مدت نسبتاً کمی در سال ۱۹۳۱ بود و برکارهای آقای

1. Wallace Hume Carothers

چالمرز[1] کانادایی تکیه داشت. آقای چالمرز کشف کرد که متاکریلات اتیل و نیز نیتریل متاکریلیک می‌توانند متحمل نوعی هم‌بسپارش شوند، و این یک شیشهٔ آلی واقعی با خواص نوری جالب توجه است. شیشه‌های متاکریلیکی را مؤسسات بزرگی در آلمان، انگلستان و امریکا حدود سال ۱۹۳۶ در مقیاس صنعتی تولید کردند و با نامهای گوناگونی: لوسیت بوسیلهٔ دوپون دونمور، پلکسی‌گلاس بوسیلهٔ شعبات امریکایی رُم و هاس به فروش می‌روند. همین نام اخیر است که در فرانسه، آلمان و ایتالیا بسیار شهرت دارد.

مشتقات دیگر آکریلی در همان زمانها یا کمی بعد مورد استفاده قرار گرفتند. مثلاً آکریلونیتریل بتدریج از سال ۱۹۴۱ موضوع پژوهش آقای هیل چارچ[2] از دوپون دونمور برای ساختن الیاف سنتزی بود درحالی‌که شیمیدانهای بایر در آلمان در سال ۱۹۴۲ به همین پژوهش دست زدند. امریکاییها که تقدیر با آنان همراه بود در سال ۱۹۴۸ اورلون را به بازار فرستادند، و درالون ساخت آلمان شش سال بعد ساخته شد.

در دورهٔ پیش از جنگ، ساخت پولی‌وینیلها در کشورهای نوآور در شیمی صنعتی سنتزی بسرعت به‌پیش رفت. چون ردیف ترکیبات وینیلی بسیار طولانی است بنابراین، فهرست فراورده‌های بسپارش یا هم‌بسپارش آنها نیز مفصّل است. در سال ۱۹۳۱ کلرور پولی‌وینیل سبب شد که یک فراوردهٔ پرکلری محلول در استون ساخته شود و در آلمان به‌شکل نخ ریسیده برای صنعت و با نام PeCe به بازار آید. این کلرید پولی‌وینیل که بعدها به پی‌وی‌سی PVC شهرت یافت، ساخت این نوع مواد را توسعه داد ـ موادی که با افزایش روشهای عمل آوردن آنها، استفاده از مواد نرم‌کننده و تحویل آنها در شکل ورق، مفتول، خمیر و غیره، کاربردهای بسیار گوناگونی یافتند. در فرانسه یک نوع الیاف کم کلر را آقای ژ. کوربیر[3] در سالهای ۴۰ برای رودی‌آستا Rhodiacéta روبه‌راه کرد که در سال ۱۹۵۰ با نام rhovyl وارد بازار شد.

هم‌بسپارش مشتقات وینیل با یکدیگر، چشم‌انداز تنوع فراورده‌ها را باز هم گسترده‌تر کرد. باید ساخت مشتقات فلوئوری، مانند تترافلوئور اتیلن را که تنها دارای کربن و فلوئور است و امکانات هم‌بسپار شدن آن را شرکت دوپون دونمور در سال ۱۹۴۱ پیش‌بینی کرده بود، نیز در نظر گرفت. چند سال بعد این پارافینهای فلوئوردار که نسبت به عوامل شیمیایی کاملاً غیرحساس می‌باشند نخست با نام تفلون، پس با نامهای دیگر روانهٔ بازار شدند.

کشپارهای سنتزی: مواد واسطه‌ای با پیوندهای اتیلنی، در همین دوره به ساخت کشپار (الاستومر)های سنتزی در همه کشورها، بویژه در آلمان، ممالک متحدهٔ امریکا و

1. Chalmers 2. Hale Charch 3. J. Corbiere

اتحاد جماهیر شوروی [سابق] رسیدند. این ماده احتمالاً بسیار سریع وارد مرحلهٔ ساخت صنعتی شد. آموخته‌های جنگ جهانی اول، عوامل اقتصادی و سیاسی میان دو جنگ، آلمان را برانگیخت که بویژه در سالهای ۳۰ به فراورده‌های جانشینی توجه کند تا از نیازمندی به ماوراءبحار آزاد شود. روسیه هم در دورهٔ نزدیک به جنگ، همین احساس را داشت و ممالک متحدهٔ امریکا، پس از شروع تجاوز ژاپنی‌ها، به کارهای خود شتاب زیاد دادند.

بررسی‌ها، نخست روی بسپارش کربورهای دی‌انی تمرکز یافت که در زنجیرهای خود، دو پیوند دوگانه داشتند تمرکز یافتند. تکپار پایه‌ای آن بسیار ساده، بوتادی‌ان $H_2C=CH-CH=CH_2$ است که واکنش بسپارش روی زنجیر آن مدتها مورد بررسی بود. حدود سال ۱۹۲۹ شیمیدانهای I.G. Farben Industrie متوجه شدند که با عملی کردن هم‌بسپارش بوتادی‌ان و استیرن، تشکیل ساختار پرشاخه را، که عمل آوردن آن بسیار دشوار است، دور بزنند. بنابراین، آنان از سال ۱۹۳۷ ساخت یک ردیف بونا S را با نشانهای S_1 و ... S_2 شروع کردند.

این ردیف که همگی در زمان جنگ ساخته شدند به‌طور منظم به انواع دیگری از بونا گسترش یافتند که مزایای فراوان داشتند.

در همین واکنشهای بسپارش است که امریکاییها در سالهای ۱۹۴۲ ـ ۱۹۴۴ به بازکردن یک ردیف GR-S (Government Rubber-Styrene) تشویق شدند. روسها از سال ۱۹۳۲ در سایهٔ کارهای آقای سرگئی لبدف بسپارهای بوتادی‌ان را، که مشابه بوناهای اولیهٔ آلمانیها بودند و با حروف SKA و SKB (کائوچوی سنتزی Synthetics Kaoutchoucs) مشخص می‌شدند، می‌ساختند و سپس یک هم‌بسپار بوتادی‌ان استیرن SKS را نیز ساختند.

اما راه دیگری هم بیدرنگ باز شد، راهی که با کاربرد کلرور دی‌وینیل $H_2C=CH-CH=CH_2$ یا کلروپرن به پیش رفت. از سی سال پیش می‌دانستند که بعضی از مشتقات کلردار کربورهای اشباع نشده می‌توانند با بسپارش، جسم کشسانی بدهند که هیچ‌کس تا آن زمان کوششی برای تبدیل آن به کائوچوی مصنوعی نکرده بود. در واقع مسأله به کلرور دی‌وینیل استیلن مربوط می‌شد که آقای نیولانت[1] آن را از استیلن ساخته بود. شیمیدانهای دیگری، بویژه آرنلدم. کالینز در آزمایشگاههای دوپون دونمور از نو به آن پرداختند. آقای کالینز بر اثر القاهای کراترز توانست در سال ۱۹۳۱ کلروپرن را تهیه کند و بسپارش آن را به یک کشپار سبب شود. این کشپار با نام نئوپرن شناخته شد و چند سال بعد، ساخت صنعتی آن آغاز گشت. این نیز ردیف طویل دیگری را تشکیل داد که شاخه‌های متعددی داشت و فراوردهٔ سوپرن در شوروی و بعدها پربونان C آلمان به این ردیف تعلق دارند.

1. Nieuwland

به دنبال بسپارش ایزوپرن $CH_2=C(CH_3)-C=CH_2$ هم‌بسپارش بوتادی‌ان با ترکیبات دیگر وینیلی، از جمله آکریلونیتریل و غیره، تنوع کشپارهای مصنوعی را باز هم بیشتر کرد. واکنش سادهٔ شیمیایی که در هر مورد روی کاغذ نوشته می‌شود، برای ساخت صنعتی آن کافی نبود. می‌بایست مسایل متعدد مربوط به روشهای رایج: نوع و طرز کاربرد مواد امولسیون کننده، ترکیبات اولیهٔ واکنش، اثر کاتالیزورگرها و دمای واکنش (کشف سال ۱۹۴۱ سیستمهای به‌اصطلاح «ردوکس= اکسایش و کاهش» به پیشرفت سرعت بخشیدند) و طبعاً ساختار و ترکیب تجهیزات کار را حل کرد. اگر به این مسایل، دستکاریهای لازم برای تکمیل فراورده‌ها را متناسب با کاربردهایی که برای آنها درنظر گرفته شده است اضافه کنیم متوجه می‌شویم که این، تکنیک صنعتی بزرگ و جدیدی است که در کمتر از دو دهه به بار نشسته است.

سرانجام باید گفت که این کوششهای خلاّقانه، پس از جنگ هم سستی نگرفت، زیرا کشپارهای مصنوعی، مشخصاتی تا آن اندازه گوناگون و رضایتبخش دارند که دیگر نمی‌توان آنها را همچون فراورده‌های سادهٔ جانشین کائوچو دانست؛ موادی هستند که باید کاربرد ویژهٔ آنها در صنایع متعدد، یا تکنیکهای کاربردی آنها را یافت.

پولی‌آمیدها: ردهٔ دیگری از بسپارهای سنتزی که در دورهٔ دوم آفرینندگی پدید آمد، پولی‌آمیدها هستند. سرگذشت نسبتاً کوتاهی دارند، زیرا هنوز ده سال از پیدایش آنها نگذشته است. این رده از چند لحاظ نمونه است. اول اینکه، پولی‌آمیدها گرایشی را به‌طور قاطع ثابت کردند که در این دوره همیشه تأیید شده است، و آن اینکه، پژوهش برای یافتن مواد تازه، دیگر نباید کوششی برای دوباره‌سازی مواد طبیعی باشد. تصادفاً مسأله مربوط به تهیهٔ نوعی الیاف بافندگی بود که بتواند جانشین ابریشم شود. شیمیدانها به این باور رسیدند که گرچه ترکیب شیمیایی ابریشم، شناخته شده است، اما ساخت مصنوعی این الیاف طبیعی محال می‌نماید.

بعداً این رده، کارایی پژوهشی را ثابت می‌کند که بدون اینکه در آغاز، هدف مشخصی داشته باشد انجام گرفته است. آقای والاس هیوم کراترز از سوی دوپون دونمور، در ۱۹۲۸ با عنوان کارشناسی بسپارهای بالا، خارج از یک برنامهٔ معین کاری، به این پژوهش اقدام کرده بود. سرانجام، «اختراع» نایلون ۶۶ میدانی را در برابر کاربردهای مواد تازه گشود که از مرز الیاف سنتزی صرف، بسیار فراتر رفت.

کارهای نخستین کراترز روی بسپارش استری تمرکز یافت که از اثر اسید سوبریک subérique

acide $COOH-(CH_2)_6-COOH$ بر اتیلن گلیکول CH_2OH-CH_2OH به‌دست می‌آمد. پس از اینکه دو سال در این راه تحقیق کرد، معلوم شد که این راه به نتایج دلخواه نمی‌انجامد. اما آقای ج. و. هیل[1] دستیار کراترز به وی توجه داد که این فراورده می‌تواند با گرم شدن، مانند نخ کشیده شود و پس از خنک شدن، این نخها را می‌توان بازکشید تا دارای بهترین کیفیت مکانیکی، استحکام و کشسانی شوند. این مشاهدات، بعدها به ساخت ردهٔ تازه‌ای از فراورده‌های سنتزی منجر شدند. اما در آن زمان کراترز ترغیب شد، که به‌جای گلیکول از دی‌آمین استفاده، و تحقیق کند که نتایج زنجیری شدن آنها با دی‌اسیدها چه خواهند بود.

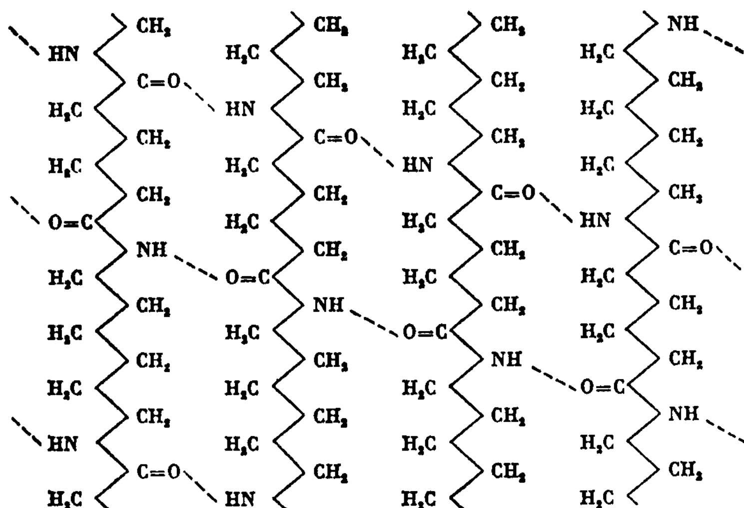
دیدیم که در ۱۹۳۱ آقایان کراترز و کالینز روی نئوپرن کار کردند و تنها در سال ۱۹۳۵، پس از بررسی شمار فراوانی از ترکیبات دو دسته اجسام بود که توانستند با تراکم اسید آدیپیک $COOH-(CH_2)_4-COOH$ و هگزامتیلن دی‌آمین $NH_2(CH_2)_6-NH_2$، ماده‌ای تولید کنند که می‌توانست به نخ طویلی تبدیل شود و همهٔ خواص ابریشم را داشته باشد.

در آلمان، در همین سالها، آقایان پاول شلاک[2] که به حساب ی. گ. فاربن ایندوستری کار می‌کرد ترکیب کاپرولاکتام را که آمیدی حلقوی از اسید آمینوکاپروئیک

CH_2
CH_2 CH_2
CH_2 CH_2
CO NH

است بررسی کرد و راه بازکردن زنجیر و به‌دست آوردن پولی‌آمید خطی را یافت. امکان بسپارش اسید آمینوکاپروئیک در سال ۱۸۹۹ بوسیلهٔ زیگموند گابریل آلمانی و پس از وی در ۱۹۰۷ توسط آقای س. فون براون هموطن وی پیش‌بینی شده بود. اما در آن زمان کسی نمی‌اندیشید که از این راه یک مادهٔ سنتزی نیتروژندار به‌دست می‌آید و شیمی آن زمان، وسیلهٔ این کار را نداشت. خود کراترز از این راه تهیه آگاه بود اما به‌علت دشواریهای موجود در ساخت اسید مربوطه نیز چون این کار با اشکال بازکردن حلقهٔ کاپرولاکتام، که در جریان گرم کردن ایجاد می‌شد مواجه بود و اتلاف قابل توجه آمینو اسید را درپی داشت، از اجرای آن صرفنظر کرد. آقای شلاک در کار خود خوشبخت‌تر بود. نخستین اختراعات ثبت شده کراترز که فاربن ایندوستری آنها را انتشار داد، با صرف وسایل بزرگی برای افزایش نتایج شیمیدان آن همراه بود و توانست در ۱۹۳۸، پرلون، نخستین نخ پولی‌آمیدی را معرفی کند.

1. J.W. Hill 2. Paul Schlack



ساختار شبکه‌ای نایلون با پیوندهای میان گروههای CO یک زنجیر و NH زنجیر مجاور، با فاصلهٔ ۴٫۸ آنگسترم، ۱۹۴۸.

شرکت دوپون دونمور بنوبهٔ خود کوشش چشمگیری برای صنعتی کردن روش کراترز به‌عمل آورد. تعداد ۲۳۰ شیمیدان آن، مدت سه سال در این راه کار کردند. این مؤسسه بزرگ امریکایی در سال ۱۹۳۸ کارخانه‌ای برای تولید آن برپا کرد و در سپتامبر ۱۹۳۹ نخستین جورابها و مسواکهای نایلونی را در روزنامه‌ها تبلیغ کرد. آقای کراترز در سال ۱۹۳۷ مرد. هزینه‌های ساخت این فراورده به ۲۷ میلیون دلار بالغ شد، اما در یک سال ۶۴ میلیون جفت جوراب فروخته شد.

وقایع جهان به دنبال آن برای امریکاییها مساعد شد درحالی‌که ساخت این فراورده در آلمان، طی سالهای طولانی متوقف بود. چندین مؤسسه بزرگ اروپا، بویژه تراست انگلیسی ایمپریال کمیکال اینداستریز (ICI) که برای تولید نخهای نایلونی با شرکت کورتاد لیمیتد[1] شریک شده بود از دوپون اجازهٔ ساخت گرفت. در فرانسه، شیمیدانی با نام میشل ژنا[2] که در شرکت پچینی کار می‌کرد و همکاران وی توانستند بر پایهٔ اسید ریسینولئیک یک نوع نخ پولی‌آمیدی بسازند که با تحمل کراکینگ، اسید اون‌دسیلنی ($C_{10}H_{19}\cdot COOH$ undecylenique) می‌دهد که می‌تواند به آمینو اسید $H_2N(CH_2)_{10}-COOH$ تبدیل شود. این جسم، همان ریلسان rilsan است که ساخت آن ده سال بعد شروع شد.

1. Courtaud Ltd 2. M.Genas

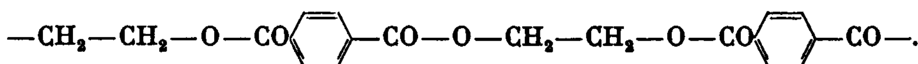
ساختار واقعی نایلون ۶۶ پس از اندک مدتی آشکار شد. نایلون را می‌توان به راههای گوناگون از ارزانترین مواد خام موجود در هر کشور تهیه کرد، بنابراین تهیهٔ آن بسیار با صرفه است. کاربرد نایلون یا مواد دیگر پولی‌آمیدی، عملاً در همه رشته‌های فنی و زندگی جاری است.

گسترش پس از جنگ: سومین دورهٔ تحول صنایع مواد سنتزی، که دورهٔ کنونی است، از سالهای ۵۰ شروع می‌شود. ویژگی این دوره، افزایش برق‌آسای تولید این فراورده‌ها در همه کشورهای صنعتی، پیدایش خانواده‌های تازهٔ بسپارها، و کاربرد مستقیم یک مادهٔ خام اولیه است.

گسترش این تولید، نتیجهٔ تلاش جنگی در تأسیس کارخانه‌های اولیه برای این فراورده‌های جدید بودند. موفقیت نایلون در میان مردم، پیش از آنکه ممالک متحدهٔ امریکا به جنگ کشیده شود تأمین شده بود؛ اما نیازهای تازه بسیار بیشتر از نیازهای مصرفی زمان صلح بود. کاربردها چنان بسرعت افزایش یافت که می‌توانستند این سالهای جنگی را بکلی نادیده بگیرند. برای همهٔ این مواد، وضع چنین بود. صلح بازگشته بود و صنعت امریکا که بسیار مجهز و آماده بود فراورده‌های خود را در همهٔ جهان سرازیر کرد و هاله‌ای از افسانه آن را در میان گرفت. کشورهایی که متحمل بیشترین زیانها شده بودند همگی در فکر نوسازی ظرفیتهای صنعتی خود با رجحان دادن به تولید مواد سنتزی بودند. صنایع دیگر آنها نیز از همین کوششها برخوردار بود و جملگی، مصرفی شده بودند.

پولی‌استرها: پیدایش خانواده‌های تازه‌ای از بسپارهای بالا مربوط به بعد از جنگ نیستند؛ اما چون اوضاع کلی، پشتیبان آنها بود، گسترش تولید آنها، چنان‌چه جنگ هم پیش نمی‌آمد، بسیار سریعتر انجام می‌گرفت.

پولی‌استرها، یا درست‌تر، دسته‌هایی از پولی‌استرها، در نیمهٔ دوم سالهای ۳۰ بخوبی بررسی شدند. امتیازات به ثبت رسیدهٔ اصلی، در سالهای ۴۴ تا ۵۰ بود و فراورده‌هایی از قبیل تریلن از ICI، در ۱۹۵۵، داکرون از دوپون در ۱۹۵۳ و فیلمها یا الیاف دیگر با نامهای بازرگانی گوناگون روانهٔ بازار شدند. آنها به‌طورکلی مشتقات یک دی اسید آلیلی، اسید تری‌فتالیک ترکیب شده با گلیکول هستند. شیمیدانها بدین‌ترتیب نوعی بسپارش را انجام دادند که بظاهر مثل بسپارش سازنده نایلون بود اما، نه از نوع پولی‌آمید:



فراورده‌هایی که از بسپارش ترفتالاتهای گلیکول به‌دست آمده‌اند خواصی مشابه پولی آمیدها دارند.

قابل توجه است که کارهای اولیهٔ پژوهشی در آزمایشگاه یک شرکت کوچک، با هزینه‌های کم انجام گرفته بود: دو شیمیدان انگلیسی با نامهای ج. ر. وینفیلد[1] و ج. ت. دیک‌سون با چند دستیار، اما هزینهٔ گسترش و صنعتی کردن آن تنها برای انگلستان به بیست میلیون پوند بالغ شد.

بررسی این نوع تراکم طبعاً شامل همهٔ امکانات کاربردی، پولی‌استرهای آلیفاتیک (خطی) بود که توسط کراترز، بیان و در سال ۱۹۴۲ بوسیلهٔ بایر «شبکه‌بندی» شده بودند، اما بویژه حدود سال ۱۹۵۰ با هم‌بسپار کردن آن با مشتقات اسید ایزوسیانیک $H-N=C=O$ بود که بعدها راه به‌سوی پلی‌اورتانها باز شد. پولی‌استرهای اشباع نشده، که با ترکیبات وینیلی هم‌بسپار شدند، در همان دوران دسته‌های دیگری از رزینها را تهیه کردند.

پولی‌اورتانها: پولی‌اورتانها هم در همان زمان مورد تحقیق بایر قرار گرفتند. آنها در اصل مشتقات اسید کربامیک $O=C\begin{smallmatrix}NH_2\\OH\end{smallmatrix}$ هستند که اوره، آمید آن است. اما بایر آنها را بروش تراکم استر ایزوسیانیک $O=C-N(CH_2)_6-N=C=O$ مشتق از هگزامتیلن دی‌آمین، که آقای کراترز در موارد دیگری آن را به‌کار برده است، با گلیکول به‌دست آورد. در این مورد هم ما در برابر یک خانوادهٔ بسیار پر ازدحامی قرار داریم که بر پایهٔ آن در سال ۱۹۴۷ کشپارهای سنتزی گوناگونی ساخته شدند.

پولی‌اتیلنها: یکی از خانواده‌های پربارآور بسپارها که در گذر سالهای ۵۰ افزایش یافته است، پولی‌اتیلنها می‌باشند. بررسی امکانات بسپارش اتیلن، در سالهای ۲۰ بدلیل اینکه آثاری روی واکنشهای شیمیایی با اعمال فشارهای زیاد داشته است وکاربرد آن در آن زمان با ساخت سنتزی آمونیاک اهمیت بسیار فراوان یافته بود، کار مستقلی شده بود. ده سال بعد، پس از گذشت مراحل متعدد، پژوهش دربارهٔ رفتار اتیلن در فشارهای بالا با رهبری چند شیمیدان ICI (ایمپریال کمیکال ایندastریز) انگلستان به پیش برده شد. در ۱۹۳۴ این گروه متعدد که زیر نظر آقایان ا. و. فاسیت[2] و ر. اُ. گیبسون و م. و. پرن[3] کار می‌کرد تصادفاً گرد سفیدی به‌دست آورد که بهترین کیفیت مورد انتظار از یک فراوردهٔ سنتزی ـ کشش، قالب‌گیری، پایداری در برابر عوامل شیمیایی و عایق بودن ـ را داشت. این گرد، بسپار بالایی بود که از اتصال زنجیری مولکولهای اتیلن، که در این تراکم، پیوندهای دوگانهٔ خود را از دست داده بودند: $-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$ ساخته شده بود. دو سر زنجیر ممکن بود برحسب روشی که برای ساخت به‌کار گرفته شده بود، ساختارهای مختلفی داشته باشند، و بر این اساس می‌توانستند زنجیرهای کوتاه یا بلند شاخه‌دار به‌دست آورند.

1. J.R.Whinfield 2. E.W.Fawcett 3. M.W.Perrin

هرچند که امتیازات این انگلیسی‌ها در سال ۱۹۳۷ به ثبت رسید، اما ساخت صنعتی آنها پس از پایان جنگ آغاز شد. در اساس، نخستین روشی که به‌کار گرفته شد، تولید نخستین بسپار در فشار ۳۰۰ اتمسفر بود. بسپارش دوم در ۲۰۰ اتمسفر انجام می‌گرفت و مقدار کمی اکسیژن به‌عنوان کاتالیزور به‌کار برده شد؛ دمای کار در حدود ۲۵۰ درجه بود.

راههای دیگری یافت شدند که به فشار بالا نیاز نبود. آقای کارل تسیگلر که در انستیتوی ماکس پلانک مولهایم[1] تحقیق می‌کرد توانست نخستین بسپارش را با تثبیت روی کلرور آلومینیم به‌عنوان پایان کار، در فشار پایین عملی کند. هنوز بسپارهای پایینی بودند که تنها از دو یا سه مولکول اتیلن تشکیل می‌شدند. چهار سال بعد وی توانست با گروه خود با همین روش، بسپارهای بالای اتیلن را بسازد و در ۱۹۵۴ با همکاری جولیو ناتا[2] ایتالیایی بسپارهای یک ردهٔ اتیلن، پروپیلن $CH_3-CH=CH_2$ را که متبلور شد، بسازند. این مادهٔ جدید، بسیار سخت و محکم بود.

در طی همین سالها، شیمیدانهای مؤسسهٔ فیلیپس پترولئوم در ممالک متحدهٔ امریکا که از اکسیدهای کروم به‌عنوان کاتالیزور استفاده کردند توانستند اتیلن و اولفینهای دیگری را در فشار ۵۰ اتمسفر، بسپار سازند. فراورده‌های به‌دست آمده، خصوصیاتی بسیار مشابه فراورده‌های تسیگلر داشتند. مؤسسات دیگر نفتی، نظیر استاندارد اوایل ایندیانا در سالهای ۱۹۵۵ ـ ۱۹۵۶ با بهره‌گیری از طبیعت کاتالیزورها (نیکل، کبالت، اکسیدهای تیتان و غیره) در فشار (۵۰ تا ۱۰۰ اتمسفر) و گرما، باز هم روشهای دیگری را به‌کار گرفتند.

در کار تولید پولی‌اتیلنها با تنها یک نوع مادهٔ خام، اتیلن یا همرده‌های بلافاصله بالاتر آن، توانستند با استفاده از واکنشهای پیش‌بینی شده و تغییر شرایط بسپارش، یک ردیف مواد جدید به‌دست آورند.

سیلیکونها: چندی نگذشت که شیمی سیلیسیم و ترکیبات آن با کمپلکسی فراوان به میدان آمدند و شباهتهایی با شیمی کربن از خود نشان داد. زمانی گمان می‌بردند که می‌توانند یک ترکیب آلی سیلیسی، نظیر R−Si−O را به یک کتون تشبیه کنند، اما این گمان بی‌درنگ کنار گذاشته شد. چندین شیمیدان سیلیکونها را بررسی کردند و توانستند ترکیبات ساده‌ای از آنها را توضیح دهند. بین سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۹۴۰، شیمی سیلیسیم به‌طور کامل در آزمایشگاه شناخته شد؛ توجه و تمرکز پژوهشهای همهٔ این شیمیدانها به این موضوع، صرفاً برحسب تصادف و به سایقهٔ کنجکاوی بود و اتفاقاً بسپارهایی از ترکیبات سیلیسیمی آلی، به‌طور غیرمنتظره به‌دست آمدند.

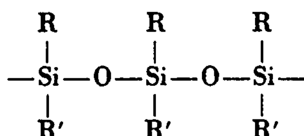
۱. Mülheim: شهری در قسمت رور، در مغرب آلمان.ـم.

2. G. Natta

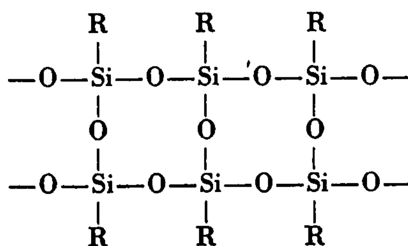
تحقیقات اولیه در سالهای ۱۸۶۳ تا ۱۸۸۰ بوسیلهٔ آقایان شارل فریدل و جیمز میسن کرافتس، و نیز فریدل و آلبرت لادنبورگ[1] انجام گرفت. اما آقای ف. س. کیپینگ[2] امریکایی بود که با کار در این زمینه در سالهای ۱۸۸۹ تا ۱۹۱۴، هستهٔ اساسی دانش ساخت سیلیکونها را به‌دست داد. آقای کیپینگ بویژه در ۱۹۰۴ از واکنش گرینیار برای اجرای نخستین سنتزهای سیلیسیمی آلی استفاده کرد و آلکیل و آریل سیلوکسانها R_2SiCl_2 را به‌دست آورد که در هیدرولیز تولید سیلانولهای مربوطه $R_2Si(OH)_2$ را می‌دهند. این ترکیبات، پایه سیلیکونها هستند. و با داشتن گروههای هیدروکسیل $OH-$ در میعان، نخستین بسپار را می‌دهند.

در واقع این امکانات، فراوان هستند، زیرا R می‌تواند گروهی از ردیفهای خطی یا حلقوی باشد و می‌توان روی یک سیلیسیم، گروههای گوناگونی را وصل کرد، و نیز اگر یکی از آنها جای خود را به Cl بدهد، یک ترکیب پایه‌ای با سه OH ـ خواهیم داشت و بسپارش می‌تواند سه بعدی باشد.

چنانچه میعان پلکانی (پولی‌کندانساسیون) ترکیبی از نوع نخست، یک درشت‌مولکول خطی بدهد، می‌توان آن را چنین نمایش داد:



و برای نوع دوم شبکه‌ای به‌شکل زیر می‌دهد



در واقع پیکربندی این درشت‌مولکولها، بسیار پیچیده هستند.

این جنبه از شیمی ترکیبات سیلیسیمی آلی، تنها در ۱۹۴۱ به‌طور مشروح روشن شد. آقای کیپینگ که به تحقیقات خود تقریباً تا این تاریخ ادامه می‌داد، به آن علاقه‌مند نشد، هدف وی مشخص کردن ترکیبات ساده بود و زمانی‌که بسپارهایی به‌شکل چسبهای مایع به‌دست آورد از تحقیق چگونگی و مشخصات آن منصرف شد. اما گرچه آقای کیپینگ غرق در یک پژوهش اساسی

1. A.Ladenburg 2. F.S.Kipping

پر بازده بود، جالب توجه است که هیچ‌یک از شیمیدانهای دیگری که به‌سوی تحقیق صنعتی روی آورده بودند کوششی برای پر کردن این جای خالی نکردند، آن هم در زمانی‌که تهیهٔ مواد سنتزی، آنچنانکه در گذشته شرح داده شد، گسترش زیاد یافته بود. در واقع، مواد خام مورد استفاده، از ترکیبات کربنی متعلق به شیمی آلی محض بودند و مشتقات سیلیسیم هنوز گویا آمادهٔ تبدیلاتی از این ردیف نبودند. وانگهی، روشهای تحقیق درشت‌مولکولها، به تازگی و پس از کارهای شتاودینگر و کراترز، بدرستی به‌کار گرفته می‌شد.

سرانجام بخاطر نیازهای صنعتی بسیار مشخصی، توجه به خواص در همجوشهای آلی سیلیسی شروع شد. شیشه‌گران و برقکاران به این نهضت تحقیق دودستی چسبیدند، نهضتی که تنها در آزمایشگاههای بسیار مجهز مؤسسات بزرگ می‌توانست به پیش رود. شروع کار، از ممالک متحدهٔ امریکا و در اواخر سالهای ۳۰ بود. مؤسسه امریکایی کورنینگ گلاوس ورکز یکی از شیمیدانها خود، آقای ج. ف. هاید[1] را مأمور تحقیق آن چیزی کرد که عادتاً به آن سیلیکون می‌گفتند تا اینکه بتواند از شفافیت آن برای ساخت جسمی محکمتر از شیشه‌های آلی ، با آمیختن آن با شیشه‌های معدنی استفاده کند. همچنین در نظر بود از خواص دی‌الکتریکی جالب توجه و نیز خاصیت آن در چسبندگی، برای تهیهٔ مواد عایق از نوع سیمهای شیشه‌ای، استفاده شود.

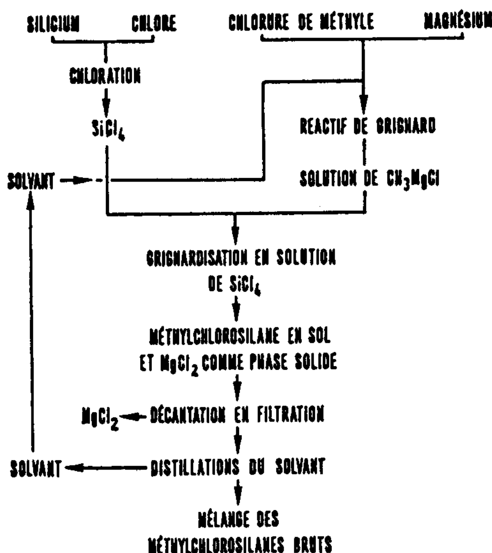
نتایج نخستین کارهای هاید، مورد توجه شرکت جنرال‌الکتریک قرار گرفت. این شرکت نیز بنوبهٔ خود، گروهی را زیر نظر آقایان و. ا. پاتنود[2] و ا. گ. روخو[3] مأمور این تحقیق کرد. در سال ۱۹۴۱ روشی برای سنتز مستقیم سیلیکونها به توسط روخو یافت شد. دراین‌روش سیلیسیم را مورد فعل و انفعال یک مشتق کلردار آلی در مجاورت مس قرار می‌دهند. مس در اینجا نقش کاتالیزور را دارد و کاربرد صنعتی آن آسانتر از استفاده از واکنش گرینیار است. بااین‌حال، روش استفاده از واکنش‌گر گرینیار باقی ماند.

در طی چند سال، نه‌تنها روشهای ساخت پیچیده‌ای به‌کار گرفته شدند و انواعی از سیلیکونها تهیه شدند، بلکه تحقیق منسجم مشخصات آنها نشان داد که با خانواده‌ای از فراورده‌ها سر و کار داریم که امکانات کاربرد آنها بسیار گسترده‌تر از کاربرد هر خانوادهٔ بزرگ دیگری است که شیمی صنعتی تا کنون آن را شناخته است.

گوناگونی بی‌نهایت پیکربندی و روابط بین گروه‌بندیهای آلی /سیلیسیم در این درشت‌مولکولها، نوعی حالتهای فیزیکی بدانها داده است که در روغنهای مایع دارای لزوجت، تا حالت کائوچویی و بالاخره جامد دیده می‌شوند. جالب‌ترین خواص فیزیکوشیمیایی آنها قدرت عایق برق و گرما

1. J.F.Hyde 2. W.I.Patnode 3. E.G.Rochow

جدول ۴. ردیف واکنشها برای تهیهٔ سیلیکونها.



بودن آنها، پایداری آنها دربرابر آثار جوی و شیمیایی، آب‌گریزی، ناچسبناکی و بالاخره پایداری آنها دربرابر گرماست. آنها را بر اساس ساختمان و حالت فیزیکی، برای کاربردهای حساس در ساخت مواد جنگی، از هر نوع: عایق، وولکانش پذیر، روانساز (یا رونواز)، ضدرطوبت و غیره برگزیدند. این همان چیزی است که تکنسین‌های امریکایی با علاقه آن را کشف کردند و به مجرد ورود امریکا به جنگ، این فراورده‌ها، که برای ساخت آنها مدتها و بی‌هدف حدود نیم سده تحقیق می‌کردند، یک‌باره در راه تولید صنعتی آن گام نهادند.

شرکتهای جنرال‌الکتریک، کورنینگ گلاس ورکز که در دورهٔ پایانی و تحقیقات تب‌آلود با یکدیگر شریک شده بودند یکی از بزرگترین مؤسسهٔ شیمیایی امریکا را با نام داوکمیکال کمپانی Dow Chemical Co تشکیل دادند و در سال ۱۹۴۲ شعبهٔ مشترکی را با نام داوکورنینگ کورپریشن Dow Corning Corporation تأسیس کردند تا نخستین تولید انبوه آن را تأمین کنند. در ۱۹۴۶ شرکت جنرال‌الکتریک با هزینهٔ خود به ساخت سیلیکونها دست زد، و در انگلستان نیز *ICI* و میدلند سیلیکانز Midland Silicones همین کار را کردند. پس از آن، طی ده سال،

تولید سیلیکونها در همهٔ کشورهای صنعتی جهان رایج شد.

زمینهٔ کاربرد مواد سنتزی: سرانجام، طی این دورهٔ سوم توسعهٔ صنعت مواد سنتزی، تحول دیگری پیش آمد. این تحول مربوط به منابع فراورده‌های پایه‌ای اکثریت بزرگ مواد بود. پیش از آغاز جنگ جهانی دوم در چند سال پس از پایان آن، نقطهٔ آغاز همانا ترکیب بسیار سادهٔ موجود، استیلن، بود که در گذشته دیدیم که تولید آن چگونه به مرحلهٔ صنعتی رسید. اما اتیلن را نمی‌توان ندیده گرفت، گرچه قابل مقایسه با استیلن نبود. بتدریج که تکنیکهای صنعت نفت در سالهای ۵۰ تحول می‌یافتند، این منابع فراوانتر می‌شدند. سرانجام استیلن جای خود را، به‌عنوان فراوردهٔ پایه‌ای این صنعت بزرگ سنتزی به اتیلن واگذاشت. کمی بعد خواهیم دید که این تحول چگونه انجام گرفت.

صنعت شیمی با گرایش از مواد خام مصنوعی به مواد سنتزی، بتدریج و بعد با جهشهایی در طی دودهٔ اخیر، سلطهٔ خود را بر همهٔ صنایع و نیز تأثیر خود را بر همهٔ جنبه‌های زندگی روزمره، گسترده ساخت.

در آغاز، این مواد جدید را به‌چشم فراورده‌های جانشین مواد سنتی می‌نگریستند. مواد سنتی در موقعیتهایی اقتصادی یا سیاسی ممکن بود کمیاب یا گران شوند، یا اینکه کیفیت آنها برای پاسخگویی به نیازهای بیان شده، گرچه تا کنون رضایتبخش بوده‌اند، نسبت به مواد جانشینی در مرحلهٔ پایینتری قرار می‌گیرند. این مطلب در مورد باکلیت صادق بود، زیرا رزینهای قالبگیری شده یا صفحات آن، خواص دی‌الکتریکی یا مکانیکی بسیار جالبی داشتند که مواد سنتی فاقد آن بودند، وانگهی هزینهٔ تولید و راه‌اندازی آن هم کمتر بود. اما این جنبه را می‌توان در موارد بسیاری نادیده انگاشت. مدتهای زیاد الیاف ریون از ابریشم گرانتر بود، اما منظره بسیار مواج و دلپذیری داشت و دیدیم که کائوچوی سنتزی اولیه، اغواکننده بود.

بااین‌حال، پس از گذشت سه دههٔ نخست از سدهٔ کنونی، معیار داوری تغییر یافت. موادی که صنعت شیمی آنها را بهتر کرده‌اند. بیشتر به مواد تکمیلی تبدیل شده‌اند تا مواد جانشینی. بعضی از آنها طبعاً مواد طبیعی را لااقل در زمینه‌های بسیار مشخصی حذف کرده‌اند. کاربرد گوتاپرکا در ساخت عایقهای برق، در اواخر سالهای ۲۰ کنار گذاشته شد. کشپارهای سنتزی را با کائوچوی طبیعی، برای بهتر کردن خواص آن، می‌آمیزند و چنین مخلوطهایی در جاهایی که صمغهای طبیعی از عهده وظایف محوله برنمی‌آیند به‌کار گرفته می‌شوند. برای استحکام تایرهای اتومبیلها و کامیونها، نخهای سنتزی به‌جای پنبه‌ای به‌کار گرفته شدند و . . . .

اگر رزینهای کلرور پولی‌وینیل برای جانشین صمغ لاکی، در ساخت و نیز پرسکاری

صفحات بسیار کوچک با شیارهای بسیار نزدیک هم، در آن زمان موجود نبود تولید صفحات پردوام گرامافون بوسیلهٔ پترگلدمارک[1] در سالهای ۱۹۴۵ ـ ۱۹۴۸ برای شعبه‌ای از Colombia Broadcasting System بدین خوبی انجام نمی‌گرفت. طبعاً پیشرفت در ضبط صدا و نیز پژوهش در ساخت بازویی بسیار سبک برای نگاهداری سوزن، مستلزم تکنیکهای دیگری بود که بسیاری از آنها از فراورده‌های صنایع شیمیایی کمک گرفته‌اند.

ما بر سر آن نیستیم که مراحل تحولی تکنیکهای گوناگون کاربردی را، تنها تحت تأثیر تهیه کردن مواد مصنوعی و سنتزی در زمینهٔ آنها بدانیم. پس از فن عکسبرداری که بی‌شبهه نخستین زمینهٔ کاربرد این مواد است، صنایع برق نیز یکی از اولین و مهمترین استفاده‌کنندگان از این مواد بوده است و بعدها، بلافاصله پس از پایان جنگ جهانی اول، ساخت هواپیماها و اتومبیلها، تکنیکهای بسته‌بندی و تزیین، اپتیک عمومی و اپتیک دقیق، مکانیک، تجهیزات شیمیایی، وسایل اتاق جراحی، پیاپی و حتی گاهی در یک زمان، دهه به دهه از گروههای کاربردهای پیوسته جدید بوده‌اند.

دستاوردها در نساجی: دراین‌باره شمارش صرف این دستاوردها کافی نیست. بهتر است دستاوردهایی را هم که در زمینهٔ الیاف بافندگی بوده‌اند بیدرنگ به‌حساب آوریم. شمار زیادی از موادی که با کارهای شیمیایی بهتر شده‌اند می‌توانند در اثر گرم کردن، محلول یا ذوب شوند و از سوراخهای نخریز مدرجی بگذرند و به نخ تبدیل شوند. طبعاً تکنیکهای گوناگون کاری، پس از پیدایش نخستین الیاف سلولوزی برای انجام ریسندگی، کشش، شست‌وشو و غیره، بمنظور تهیهٔ انواع فراورده‌های مطلوب، پدید آمدند. وانگهی ساخت مواد تازه از راه هم‌بسپار بمنظور افزایش گوناگونی انواع بسپارهای رایج، آغاز شد.

درکار ساخت بعضی الیاف طبیعی، مانند پنبه و کتان توانستند مثلاً در سایهٔ اختراع روش چروک‌ناپذیرسازی ـ که دستاورد پژوهش دراز مدتی بود که از سال ۱۹۱۸ تا ۱۹۳۲ با سماجت به‌وسیله گروه کوچکی از پژوهندگان، در استخدام شرکت انگلیسی Tootal Broadhurst Lee با مدیریت آقای سر کنت لی[2]، پیگیری شد ـ موفقیتهایی در بهتر شدن کیفیت آنها پدید آورد. این روش صنعتی شده، شامل آغشته کردن نخها با موادی است که در جریان نوعی عملیات حرارتی، تشکیل رزینی روی خود نخ می‌دهند. علاوه بر نخ طبیعی، نخ مصنوعی یا سنتزی نیز می‌تواند از این روش بهره گیرد.

این نخها باید کوتاه باشند که از دستگاه ریسندگی مانند نخهای طبیعی بگذرند. نخستین هدف همهٔ پژوهندگان ساخت نخهای شیمیایی، به‌دست آوردن نخ طویل با گذرانیدن مایع دارای لزوجت

1. Peter Goldmark 2. Kenneth Lee

از دستگاه نخ‌ریز بود. اما در آن زمان که هنوز تنها نخهای سلولوزی را می‌شناختند، مقداری نخهای ردّی باقی می‌ماند که بزودی اندیشیدند که با ریسیدن آنها با وسایل ریسندگی معمولی، آنها را مورد استفاده قرار دهند. سپس طی جنگ جهانی اول، برای جبران کمبود الیاف طبیعی، بویژه پشمی، کاربرد الیاف کوتاه شیمیایی را که با قیچی کردن الیاف بلند به‌دست آمده بودند، سیستماتیک کردند. نخستین امتیازهای به ثبت رسیده، تاریخهای ۱۹۱۱ و ۱۹۱۳ را دارند؛ اما در سالهای ۲۰ بود که خامهٔ سلولوزی به‌مقدار فراوان وارد بازار شد. این قیچی کردن نخها به الیاف کوتاه و عمل آوردن آنها، در همهٔ فراورده‌هایی که بعداً ساخته شدند تکرار شد.

بدین‌ترتیب، صنعت نساجی بسرعت هم از لحاظ تعداد و هم از جنبهٔ گوناگونی مواد خام، گسترش یافت و علاوه بر آن، مخلوط نخهای طبیعی و غیرطبیعی به این صنعت امکان داد که هرگونه کیفیت مطلوب مکانیکی و بافندگی نخهای ریسیده، تقریباً به‌طور کامل، به‌دست آید. الیاف طبیعی، که هرگز از دور خارج نشدند، مقام خود را در صنعت پوشاک، مثلاً برای رفع نیازهای مربوط به کیفیت پارچه‌ها حفظ کردند. با کاربرد نسبتی از الیاف شیمیایی، کیفیت آنها بهتر می‌شد. پس از جنگ جهانی دوم بود که کاربرد تار بریده staple بسرعت تعمیم یافت.

نابافته‌ها: در این زمان فراورده‌ای از نوع دیگر، «نابافته» به بازار آمد و کاربرد آن، در طی سالهای ۵۰ در ممالک متحدهٔ امریکا و در دهه‌های بعدی در قاره‌های دیگر، گسترش یافت. در اینجا هم دربرابر ما امکانات فنی بسیار زیادی قرار دارند. این امکانات، نخست مربوط به طبیعت الیاف کار شده، نه‌تنها طبیعت شیمیایی، بلکه ابعاد آنها می‌باشند: الیاف کوتاه به طول سه میلیمتر یا تار بریده که چهار تا شش سانتیمتر طول دارند. باز این امکانات مربوط به‌ترتیب الیاف، پس از پراکندگی آنها، یعنی وضع فتیله است. پژوهش در این زمینه، بویژه روی این مسایل و نیز روی وسایل فیزیکی مربوط به فتیله سازی، گردش هوا یا جریان آب، تمرکز داشت.

تکنسین‌ها به سائقهٔ کنجکاوی در تحول، خواستند فتیله را با رشته‌های پیوسته انجام دهند که خود ساختار فتیله می‌توانست به دل‌خواه، تحت تأثیر بعضی عوامل فیزیکی در زمان ریسندگی، آماده شود. در واقع، در اینجا ما به پایان یک خط طویل پژوهش رسیده‌ایم که ریشه‌های آن به آغاز سده برمی‌گردد ـ خطی که در جریان دهه‌های پس از جنگ دوم به‌کار بردهای صنعتی منجر شدند. تهیهٔ الیاف، مثلاً تارچه‌ای، که با روزنرانی جرم مذاب یا محلول، طبق روشی که آقای کراتزر در ۱۹۳۸ مطرح کرده است، برای ساختن فتیله‌های نابافته گسترش یافت. کاربرد چسبهای شیمیایی، افزایش الیاف ترموپلاستیک (گرمانرم) یا عمل آوردن مکانیکی بمنظور تأمین استحکام فتیله‌ها نیز

باید پیاپی رواج گرفته باشند.

سرانجام، روشهای ساخت چنان گوناگون شدند که نابافته‌ها در ساخت ماهوت، چرمهای مصنوعی، پارچه‌های پوشاکی (آستریها و فراورده‌های ذوب چسبنده با اطو)، قواره‌هایی برای صافی در صنعت، کاغذهای سنتزی، فراورده‌های بسته‌بندی و غیره به‌کار گرفته شدند.

این چند عمل کلی مربوط به تحول صنعت نساجی تحت تأثیر نفوذ مواد شیمیایی را کارهای کوچک دیگری در تحول این مواد، تکمیل کرده‌اند. نظر این بود که این مواد شناخته شده را در کار الیاف تازه یا اختلاط تازه‌ای از الیاف به‌کار گیرند. بدین‌ترتیب ناچار از ایجاد مواد جدیدی برای اجرای کارهای تازه، تهیهٔ فتیله‌های منظم از طریق روزنرانی و غیره بودند. چنانچه این مجموعه وسایل و امکانات را در همهٔ زمینه‌های صنعتی، که مواد مصنوعی و سنتزی در آنها راه یافته‌اند وارد کنیم، می‌توان تصوری از مقدار تأثیر صنعت شیمی معاصر در تحول همهٔ روشهای تولید صنعتی به‌دست‌آورد.

مهندسی شیمی

تغییر شکل ساختار صنعت شیمی کلاسیک، چنانکه در دههٔ نخست این سده بود، به ساختار مهندسی شیمی، بتدریج و متناسب با پیشرفت رشته‌های تازه‌ای انجام گرفت که پیدایش و تکامل آنها را دیدیم. اما بخش دیگری از صنعت شیمی نیز در این تغییر شکل سهیم بود، و آن شیمی صنعت نفت است که معمولاً و بنادرست آن را پتروشیمی (= شیمی سنگ) می‌خوانند، درحالی‌که باید پترولئوشیمی گفت.

پژوهش دربارهٔ هیدروژندهی: این پژوهش دقیقاً با آغاز این سده شروع شد. نخستین مراحل آن را با تاریخ نخستین تقطیر صنعتی نفت (صفحات ۶۴۰ تا ۶۴۲) دیدیم. آنچه که در اینجا باید تأکید کنیم مسأله شعبات پژوهشهای آزمایشگاهی دربارهٔ هیدروکربنهاست که زمانی پدید آمد که شروع به استفاده از هیدروکربنها به‌عنوان سوخت در موتورهای احتراقی شد. اما در تحقق این روش مهم عوامل دیگری هم مؤثر بودند که اولین آنها پراتیک سنتز صنعتی آمونیاک بر پایه نیتروژن و هیدروژن بود. این کار در واقع بخش بزرگش بر پایهٔ واکنشهای هیدروژندهی بود که نخست، تکنیکهای مهم این صنعت تازه را پی‌ریزی کردند: هیدروژندهی به اکسید کربن، هیدروژندهی زغال‌سنگ در اول و سپس هیدروژندهی هیدروکربنها، بعداً. اما بعدها در پایان سالهای ۳۰، واکنشهای هیدروژن‌زدایی بود که برای تهیهٔ مواد خام این صنعت بزرگ، اهمیتی خاص یافت.

گاه‌شماری تحولات صنعت شیمی در این زمینه طی نیم سدهٔ ۱۹۱۰ ـ ۱۹۶۰، کار بسیار

دشواری است. صنعتی که یکی از بخشهای بسیار مهم اقتصاد سراسر جهان را تشکیل می‌دهد.

شاید پایهٔ این جنبش بزرگ را بتوان بر پژوهشهای آزمایشگاهی قرار داد، که به‌نظر نمی‌رسد کاربردهای صنعتی یافته باشند. یکی از کهنترین آنها جزء کارهای برتلو دربارهٔ سنتزهای بنیانی ترکیبات آلی بوده است: استیلن، الکل اتیلیک، اسید استیک و غیره. آقایان پل و آرنو (پسر و نوهٔ آقای تنار شیمیدان)، نخستین کسانی بودند که در سال ۱۸۷۳ با قرار دادن مخلوطی از هیدروژن و اکسید کربن تحت تأثیر تخلیه‌های برقی، یک مایع روغنی به‌دست آوردند. سی سال بعد آقایان پل ساباتیه و ژان باتیست ساندرن[1] برای نخستین بار، هیدرورندهی کاتالیزوری اکسید کربن و انیدرید کربنیک و نیز تبدیل آنها به متان را عملی کردند. کاتالیزورگر این عمل، نیکل و دمای کار حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه بود.

امتیازهای متعددی در سالهای بعد در مورد ساخت متان از طرف ساباتیه و ساندرن در سال ۱۹۰۵ و نیز از سوی شیمیدانهای انگلیس و آلمان به ثبت رسیدند، اما هرگز مورد استفاده قرار نگرفتند. مانع اصلی این کار، دشواری خالص کردن گاز آب بود.

در طی این دهه‌ها، ترکیب نفتهای حوضه‌های مختلف رفته رفته بخوبی شناخته شد، اما باز هم دربارهٔ نوع و درصد هیدروکربنهای آن شک و تردیدهایی باقی ماند، بدون آنکه از سازاهای دیگری که در این مخلوط بسیار متنوع وجود دارند سخن بگوییم. وانگهی، کوشیدند تا از راههای تجربی، هیدروکربنهای با وزن مولکولی زیاد را از نو بسازند ـ کاری که تنها برای اثبات یا رد نظراتی دربارهٔ پیدایش نفت انجام می‌گرفت.

ساباتیه و ساندرن با گسترش هیدروژندهی به استیلن و استفاده از نیکل به‌عنوان کاتالیزور در سال ۱۹۰۵ یک ردیف هیدروکربنها را تا حد فراورده‌های مایع و نیز فراورده‌های تراکم استیلن به کربورهای آروماتیک به‌دست آوردند ـ کاری که در آن زمان سنتز نفت خوانده می‌شد. آقای ولادیمیر ن. ایپاتیف شیمیدان روس که در شیکاگو کار می‌کرد، بنوبهٔ خود «سنتز» نفت را با بسپارش اتیلن در دماهای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه، بدون کاربرد کاتالیزور، در سال پس از آن عملی کرد. ایپاتیف در این زمان به‌مناسبت اینکه در سالهای ۱۸۹۲ ـ ۱۸۹۶ روشی برای سنتز ایزوپرن (کربور اشباع نشده‌ای که در آن زمان می‌دانستند که ترکیب اساسی کائوچو می‌باشد) پیشنهاد کرد مشهور شده بود.

پژوهشهای دیگر وی در مجاورت کاتالیزور و در فشار انجام گرفته بودند. وی از فشارهای ۵۰۰ اتمسفر و بیشتر استفاده می‌کرد. در این دوره چنین روشهایی، با بدبینی تلقی می‌شد و بویژه ساباتیه بدانها اعتقاد نداشت زیرا از «هیپرپرسیون» برای سنتز آمونیاک استفاده شده بود. آقای

1. J-B.Senderens

ایپاتیف همچنین از نخستین شیمیدانانی بود که کاتالیزور هتروژن و فعالیت کاتالیزوری شمار زیادی از ترکیبات معدنی مخصوصاً اکسیدهای فلزی را بررسی کرده بود.

او در جریان کارهای خود یک ردیف تمام از هیدروکربنها را به‌دست آورد. سپس به‌کار بسپارش گازهای کراکینگ روی آورد. یکی از کاتالیزورهای مورد استفادهٔ وی، اسید فسفریک بود که بعداً در سال ۱۹۲۷ در آلمان برای همین منظور به‌کار گرفته شد.

از مشخصات سالهای پیش از جنگ جهانی اول، انجام پژوهشهای مربوط به گسترش روشهای هیدروژندهی جهت سنتز آمونیاک با مواد دیگری جز نیتروژن بویژه با زغال‌سنگ، لینیت، روغنها و قطران است. آقای فریدریش برگیوس[1]، شیمیدان آلمانی، نظریهٔ این روش را بیان داشت و در ۱۹۱۳ نخستین امتیازها را به نام خود به ثبت داد. تهیهٔ هیدروکربنها با این روش، نتیجهٔ کارهایی است که برگیوس مدت چند سال برای تعیین منشأ زغال‌سنگ و نفت انجام داده بود. اما روشهایی که وی به‌ثبت رسانیده بود تا سالهای ۱۹۲۴ ـ ۱۹۲۶، یعنی زمانی‌که آقای پیر[2] مولیبدن و تنگستن را به‌عنوان کاتالیزور به‌کار گرفت و جریان عملیات به یک فاز مایع و سپس فاز بخار تقسیم شد، نمی‌توانستند در صنعت به‌کار روند. برگیوس در ۱۹۲۵ حقوق همه امتیازات خود را به BASF فروخت.

در سال ۱۹۱۳، باز هم BASF، اختراعاتی را برای هیدروژندهی به اکسید کربن به ثبت رسانید، در این زمان، امکان تهیهٔ شمار زیادی ترکیبهای شیمیایی از آن را پیش‌بینی می‌کردند و بزرگترین دشواری کار این بود که نمی‌دانستند که آیا امکان هدایت مناسب واکنش برای تهیهٔ فراورده‌های معین و پرهیز از تشکیل مخلوطهای هیدروکربن و ترکیبات اکسیژنداری که جدا کردن آنها در محدودهٔ اقتصادی غیرممکن است، وجود دارد یا خیر؟

دوران مخاصمات و سالهای بلافاصله پس از جنگ، کاربرد آنچه را که وجودش لازم می‌نمود به عقب انداخت. دیده شد که کوششهای شیمیدانهای آلمان، متوجه راه‌اندازی ساخت آمونیاک سنتزی و اسید نیتریک شد. پژوهشهایی که به تازگی راه‌به‌جایی برده بودند در سال ۱۹۲۲ با کوشش بیشتر به پیش کشیده شدند و میدان کاربرد آنها در بیست سال بعد چنان گسترده شد که در یک زمان در جهات مختلف توسعه یافت.

روش سنتز: از میان فراورده‌های هیدروژندهی به اکسید کربن، یکی هم متانول، CH_3OH، ساده‌ترین همه الکلهاست. تا آن زمان این الکل را از تقطیر چوب در ظروف دربسته به‌دست می‌آوردند، و مادهٔ خام مهمی برای صنعت شیمیایی به‌شمار می‌رفت. ردیفی از اختراعات BASF

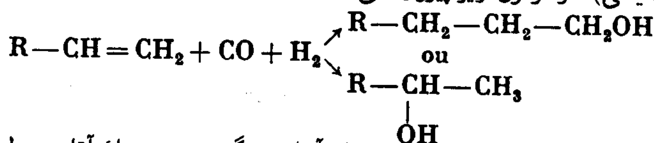
1. F.Bergius 2. Pier

که در ۱۹۲۳ و ۱۹۲۴ به ثبت رسیدند شامل ساخت سنتزی متانول بر پایهٔ گاز آب که در فشار انجام شده است و کاربرد همه کاتالیزورهای ممکن در دماهای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه بود. در گروههای زیادی که برای ساخت این ماده کار می‌کردند، آقای الوین میتاش هم بود که در عملی کردن سنتزهای نیتروژن شرکت کرده بود. این مؤسسه آلمانی در سایهٔ تجربیاتی که به‌دست آورده بود توانست تولید متانول خالص را تقریباً بیدرنگ شروع کند. در برههٔ بین دو جنگ جهانی در آلمان برای برپا کردن چندین واحد تولید این ترکیب، کوشش خاصی به‌عمل آمد. کارخانه‌هایی که فعلاً در آلمان غربی قرار دارند ۱۸۰۰۰ تن متانول در ۱۹۲۸ و ۱۲۸۰۰۰ تن در ۱۹۴۴ تولید داشتند. در فرانسه، نخستین تولید متانول سنتزی، کمی پس از آلمان، درکارخانهٔ شرکت کولمن واقع در بتون[1]، بر پایهٔ کارهای ژ. پاتار عملی شد که بویژه اثر اکسید روی و مس را به‌عنوان کاتالیزور تحقیق کرده بود.

حلال صنعتی، ضدیخ، مضاف به سوختها و پروپرگولها، نقطهٔ آغازی برای تهیهٔ آلدئید فورمیک، اسید استیک، کلرور استات متیل، متانول، پایهٔ شمار مهمی از ساختهای بزرگ است.

در زمانی‌که سنتز متانول توسعه می‌یافت، درصدد برآمدند تا از همین اصول برای ساخت فراورده‌های بالاتر استفاده کنند، اما تنها نتایجی که برای صنعت داشت، مواد مربوط به ساخت الکل ایزوبوتیلیک بود. $(CH_3)_2CH-CH_2OH$ امتیازهای اولیه در سال ۱۹۲۳ بوسیلهٔ BASF به ثبت رسیدند. این الکل، مصرف صنعتی فراوان داشت؛ اما برای آلمان، سود آن در امکان تبدیل به ایزوبوتیلن جهت ساخت کائوچوی سنتزی بود.

وانگهی این روش ساخت الکل ایزوبوتیلیک، سودمندی خود را طی سالهای پنجاه از دست داده بود، درحالی‌که روش تهیهٔ الکلهای ردیف بالا، در نتیجهٔ تأثیر اکسید کربن و هیدروژن بر اولفینها (کربورهای دارای پیوند اتیلنی)، از فرمول زیر پیروی می‌کند:

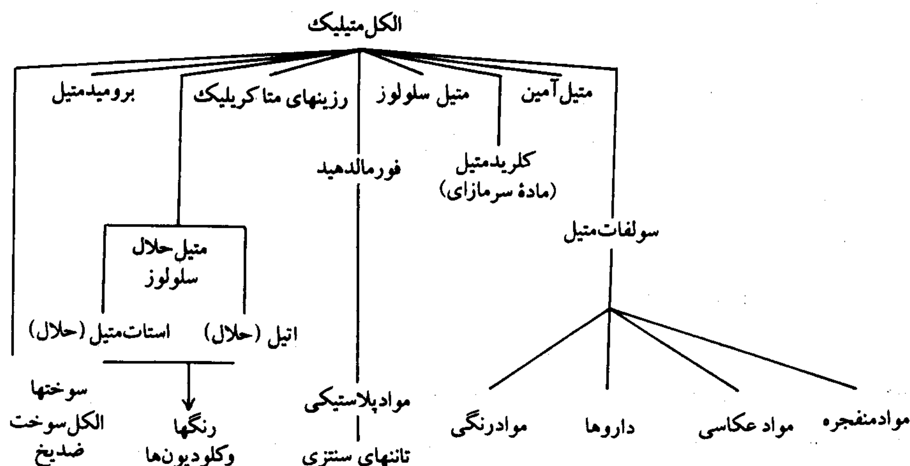


$$R-CH=CH_2+CO+H_2 \rightarrow R-CH_2-CH_2-CH_2OH \text{ ou } R-CH(OH)-CH_3$$

این نوع واکنش به‌اصطلاح اوکسو oxo کمی پیش از آغاز جنگ دوم بوسیلهٔ آقای رولن[2] شیمیدان آلمانی برای یکی از مؤسسات مبتکر در سنتز متانول، Ruhrchemie AG بررسی شده بود. این روش در جریان جنگ برای تولید الکلهای چرب به منظور ساخت مواد پاک‌ساز، تکمیل شد. اما شرایط اقتصادی پس از جنگ امکان کاربرد آن را در آلمان نداد و حال‌آنکه ممالک متحدهٔ امریکا و انگلستان که کربورهای اتیلنی را بسیار آسان به‌دست می‌آوردند، آن را

1. Bethune 2. Roelen

جدول ۵.کاربردهای الکل متیلیک در صنعت الکل متیلیک



عملی ساختند. بدین علت بود که الکلهای بالا و مشتقات آنها، که تا آن زمان نسبتاً کمیاب بودند، به فراوانی روانهٔ بازار شدند.

این نمونه نشان می‌دهد که تکنیکهای شیمی صنعتی پس از جنگ جهانی دوم، تا چه اندازه در تحول انعطاف یافته بودند.

سنتز فیشر-تروپش: آقای میتاش که در سنتز آمونیاک، نقش داشته است، کمی بعد به‌اتفاق آقای شنایدر با تحت تأثیر قرار دادن گاز آب به کاتالیزورهایی که از اوسمیم و کبالت ساخته شده بودند، همراه با فشار و گرما، هیدروکربنهایی با کربن بالا، تهیه کرد. این دستاورد، پس از سنتزکردن متانول با همکاری آقایان پیر و ک. وینکلر بود. در همین زمان آقای فرانتس فیشر که او نیز به این پژوهش دلبسته بود، تهیه هیدروکربنها را ادامه داد. وی همراه با همکارش تروپش در ۱۹۲۱ در انستیتوی کایزر ویلهلم (بعدها به انستیتوی ماکس پلانک تغییر نام داد) واقع در مولهایم نخست سینتول را ساخت.

فراورده‌ای که با این نام ساخته شد، آمیزه‌ای از ترکیبات اکسیژندار و همرده‌های آلیفاتیک، اسیدها، الکلها، ستونها، آلدئیدها بود. واکنش مخلوط اکسیدکربن هیدروژن در دمای ۴۰۰ درجه و

۱۰۰ اتمسفر فشار در مجاورت کاتالیزور انجام می‌گرفت. synthol که باز هم در فشار گرم می‌شد به synthin آمیزهٔ هیدروکربنهایی که بی‌درنگ به‌عنوان سوخت به‌کار گرفته شد، تبدیل شد.

فیشر و تروپش به مدت چند سال بررسی این تبدیلات را ادامه دادند. آنها ثابت کردند که چنانچه فشار واکنش را پایین آوریم درصد هیدروکربنهای تشکیل شده در برابر درصد ترکیبات اکسیژندار بالا می‌رود.

سرانجام در ۱۹۲۵ که کاتالیز خود را تکمیل کرده بودند توانستند سنتز هیدروکربنهای بالا را در دمای نسبتاً پایین ۲۰۰ ـ ۲۵۰ و فشار اتمسفر، انجام دهند. اما برای اینکه به راه‌اندازی روش فیشر ـ تروپش و تهیهٔ طرح واحدهای تولید آن اطمینان حاصل شود لازم بود که حدود ده سال دیگر بگذرد. نخستین واحد تولید آنها در آوریل ۱۹۳۶ راه افتاد و پیش از پایان همین سال سه واحد دیگر آماده شدند و با یک ضربه، ظرفیت تولید اولیهٔ نفت سنتزی به ۲۰۰۰۰۰ تن در سال رسید. این کوششها هم برای اصلاح روشها و هم بمنظور افزودن تجهیزات با سرسختی پیگیری شد. خود این روش پیوسته متحول می‌شد. در ۱۹۴۴ پس از یک مبادلهٔ اطلاعات بین کارخانه‌های آلمان، توانستند این واکنش را در فشاری متوسط و در مجاورت کاتالیزور «آهن» (چون کبالت بسیار کمیاب شده بود) انجام دهند. تعداد این کارخانه‌ها به رقم نه رسید و ظرفیت تولید آنها، چنانچه شش کارخانه در اثر خرابی، تعطیل نمی‌شدند، در سال به ۷۴۰۰۰۰ تن بالغ می‌شد. تولید واقعی آنها در ۱۹۴۲ برابر ۵۵۲۰۰۰ تن بود که در ۱۹۴۴ به کمتر از ۲۷۹۰۰۰ تن رسید.

دیده می‌شود که سنتز متانول و سنتز هیدروکربنها بر اساس گاز آب، که مخلوطی از اکسید کربن و هیدروژن است، لااقل در اصول به یکدیگر نزدیک هستند. ممالک متحدهٔ امریکا کمی پیش از سال ۱۹۳۰ به سنتز متانول علاقه‌مند شد و پس از جنگ جهانی دوم بروش گاز آب نخستین کارخانه در ۱۹۴۹ گشایش یافت. کشورهای دیگر کمی پیش از این مملکت، به هر دو سنتز روی آورده بودند.

هدف سنتز نخست که تهیهٔ سوختهای سنتزی بود بعدها اولویت خود را از دست داد؛ اما سنتز فیشر ـ تروپش با اصلاحاتی که در آن شد بر تحول صنعت شیمی اثر مهمی گذاشت: این سنتز منبعی برای شمار زیادی از فراورده‌های واسطه‌ای شد که پس از جداسازی و عمل آوردن آنها در رأس فهرست این مواد جای داده شدند. این فرصتی برای پیشرفت فن کاربرد کاتالیزورها بود ـ چیزی که به سود تکثیر روشهای کراکینگ و رفورمینگ هیدروکربنهای طبیعی تمام شد. سرانجام این کار، ارزیابی مجدد اهمیت شماری فراورده‌های استخراجی زغال‌سنگ، لینیت، تورب

و گاز را موجب شد. این مسأله مانند روشهای مستخرج از اختراعات به ثبت رسیده برگیوس در بسط قابل توجه تکنیکهای استخراج پتروشیمی مؤثر افتاد.

هیدروژندهی در فشار و کراکینگ: پیشرفت روشهای برگیوس بر پایهٔ تجربه‌ای بود که در ۱۸۹۶ بوسیلهٔ برتلو انجام گرفت. برتلو در جریان این تجربه، توانست با گذرانیدن جریانی از هیدروژن بر روی زغال‌سنگ خرد شده، تعدادی مواد روغنی شکل به‌دست آورد. هرچند که نخستین اختراعات به ثبت رسیده تاریخ ۱۹۱۳ را بر خود دارند، همان‌گونه که گفتیم، پیشرفت این روش طولانیتر و دشوارتر از روش فیشر ـ تروپش بود. پس از پایان جنگ جهانی اول، در آلمان تا سال ۱۹۲۴ آزمایشها تجدید نشد و دو سال بعد به کارهای نیم صنعتی در لنا[1] انجامید.

بااین‌حال، اصل هیدروژندهی با فشار، در این دوره درکراکینگ فراورده‌های نفتی گسترش یافت. روش کراکینگ تقریباً از دورانهای نخست پالایش عملی می‌شد، زیرا مولکولهای هیدروکربنهای سنگین در گرما، کم و بیش مقداری تفکیک می‌شوند؛ گرچه در آن زمان درپی به‌دست آوردن اجزای سبکتر نبودند. در سال ۱۸۵۵ آقای سیلیمن[2] در نیویورک مشاهده کرد که بخار داغ با دمای بیشتر از ۳۰۰ درجه چه آثاری دارد. کراکینگ از سال ۱۹۱۲ به‌طور پیگیری با روش برتن عملی می‌شد، و طبق آن، نفت در ظرفی در دمای ۴۰۰ تا ۴۵۰ درجه، تحت فشار ۵ تا ۶ اتمسفر قرار می‌گرفت.

طی سالهای ۲۰ کوششهای شیمیدانها و نفتگران روی کراکینگ تمرکز یافت، زیرا در برابر مشکل تازه‌ای قرار گرفته بودند: ساخت انبوه بنزینهای سبک برای موتورهای هواپیما و اتومبیل که جنگ جهانی اول کاربرد آن را نسبت به دههٔ نخست این سده، بسیار بالا برده بود. در این زمان تشویش بسیار زیادی دربارهٔ افزایش سریع مصرف سوخت ابراز می‌شد. طی شش سال، از ۱۹۱۷ تا ۱۹۲۳، این مصرف دو برابر شده بود. موتور دیزل نیز بنوبهٔ خود شروع به‌کار در راه‌آهن و کشتی کرده بود. و بازار تازه‌ای برای نوع دیگری از سوخت، اما باز از نوع نفت گشوده‌بود. مازوت نیز برای گرم کردن دیگهای بخار به‌کار گرفته می‌شد. طبعاً مصرف لیزانه‌ها برای روغنکاری نیز با همین نسبت افزایش یافته بود.

در سالهای ۱۹۲۸ ـ ۱۹۲۹ ارزیابی می‌شد که منابع نفت ممالک متحدهٔ امریکا، اولین تولیدکننده و نیز مصرف‌کننده، طی بیست سال به پایان رسد و منابع کشورهای دیگر، طی شصت یا هشتاد سال دیگر. در چنین حال و هوایی بود که پژوهشهای فراوانی برای مصرف بهتر فراورده‌های نفت طبیعی انجام می‌گرفت.

1. Lenna 2. Sillimann

کراکینگ کاتالیزوری که نوآوری پراهمیتی در عمل‌آورن فراورده‌های پالاییده نفت بود در سال ۱۹۳۰ به مقیاس صنعتی رسید. این روش در اساس، پیش‌درآمد رواج سنتزهای کاتالیزوری در این صنعت بزرگ شیمیایی، پس از جنگ جهانی دوم بود. روشهای دیگری نیز در همین دور ه به‌کار گرفته شدند که بویژه باید از رفورمینگ کاتالیزوری نام برد که هدف آن نه‌تنها شکستن زنجیر هیدروکربنهای مورد عمل، بلکه همچنین بهتر ساختن ساختار آن بود. تمامی این تحول، در وهلهٔ نخست، مدیون کوششهای پژوهندگان منفرد، نظیر آقایان یوجین هودری، رانندهٔ اتومبیلهای کورسی، که بعداً صنعتگر شد، و ا. آ. پرودم(*) داروساز بود. اما نوآوریهای اولیه تا رسیدن به مرحلهٔ کاربرد صنعتی را شرکتهای نفت امریکا هدایت کردند.

تهیهٔ فراورده‌های مصنوعی در همین ردیف جای دارند. دیده شد که روش فیشر ـ تروپش برای پاسخگویی به این تشویش به‌پیش برده شد. در مورد روشهای برگیوس نیز این ادعا درست است. اما در همان زمانی‌که روش هیدروژندهی با فشار زغال تکمیل می‌شد، درپی روشی برای اجرای کراکینگ فراورده‌های سنگین نفت با فشار زیاد هیدروژن بودند.

در واقع می‌دانستند که کراکینگ با فشار کمی بالا، سبب می‌شود که نه‌تنها هیدروکربنهای سبک به‌دست آید، بلکه هیدروژن گازی هم تولید می‌شود. در اینجا با تشکیل اولفینهای اشباع نشده‌ای سر و کار داریم که تحت تأثیر گرما بسپار می‌شوند و فراورده‌های متراکمی ایجاد می‌کنند که تا ایجاد قیر و کک به‌پیش می‌روند. فراورده‌های اخیر در شکل رسوب جامد، مجراها را می‌بندند و کار را متوقف می‌سازند. برای از بین بردن ناراحتیهای مربوط به کارِ گسسته، آقای برگیوس پیشنهاد کرد که کراکینگ در زیر ۱۰۰ اتمسفر فشار هیدروژن انجام گیرد. روش کراکینگ هیدروژنی حدود سال ۱۹۳۰ به‌کار گرفته، اما تولید انبوه آن در سالهای ۱۹۵۰ عملی شد، یعنی زمانی‌که دقیقاً هیدروژندهی به زغال‌سنگ برای تهیهٔ نفت سنتزی کنار گذاشته شده بود.

نفت سنتزی برگیوس: بویژه جنبهٔ اخیر کاربرد اختراعهای برگیوس در آلمان آیندهٔ درخشانی داشت. در طی سالهای پیش از جنگ و هم در دوران جنگ، آلمانیها تعداد دوازده کارخانهٔ هیدروژندهی به زغال‌سنگ لینییت، و قطران برپا کردند. این کارخانه‌ها انواع سوختها را تهیه می‌کردند و ظرفیت کل آنها در سال ۱۹۴۴ به آنها امکان داد که حدود چهار میلیون تن نفت سنتزی بسازند که بیش از نصف مصرف این کشور در سال ۱۹۳۸ بود. پس از جنگ، تنها چند کارخانه کار خود را ادامه دادند، اما هیدروژندهی زغال‌سنگ میدان را برای هیدروژندهی به برشهای سنگین نفت، به دلایل اقتصادی، خالی گذاشت. عملیات اخیر که از سال ۱۹۳۰ در ممالک متحدهٔ امریکا انجام

می‌گرفت، پس از جنگ به دلایل اقتصادی دیگری غیر از آنچه در اروپا بود، کنار گذاشته شد.

با این همه باید گفت که اجرای روشهای برگیوس، شیوه‌های هیدروژندهی تحت فشار را عمومیت بخشیده بود. این شیوه‌ها به پالایش هیدروژن دهنده نفت کشیده شد و این زمانی بود که یکی از روشهای متأخر تبدیل فراورده‌های نفت، رفورمینگ کاتالیزوری، به منبعی از هیدروژن ارزان تبدیل شده بود.

تداخل شاخه‌های صنعت: نمونه‌هایی که آمد می‌توانند تصوری از فرایندهایی ایجاد کنند که بر اساس آنها، صنعت بزرگ شیمیایی سنتزی به‌طور فزاینده‌ای به صنعت نفت، متصل می‌شوند و این تحول تکنیکی و اهمیت اقتصادی آن، بتدریج که موتورهای درونسوز در همهٔ اشکال فعلی خود، جای ماشینهای بخار را می‌گیرند یا اینکه کاربردهای تازه‌ای می‌یابند، شتاب بیشتری می‌گیرد.

تکنیکهای شیمی نفت، علاوه بر تسلط بر بعضی عملیات صنعتی در فازهای گازی یا مایع، بسط کاربرد کاتالیزورها، چه برای واکنشهای شکننده زنجیرهای طویل، و چه به منظور بسپارش بر اساس ترکیبات سبک، تغییرات مهمی در منابع مواد خام مربوط به سنتزهای بزرگ صنعت شیمی ایجاد کردند. تا حدود سالهای ۵۰، استیلن نقطهٔ آغاز کلی برای بیشترین تعداد این فراورده‌ها بود. اما روشهای کراکینگ فراورده‌های نفتی در این زمان، شروع به تولید گازهای واکنشی غنی از اولفینها و بویژه از اتیلن کردند. عملیات شست‌وشو یا جداسازی با روش لینده امکان تهیهٔ مقدار روزافزون اتیلن را فراهم کردند و اتیلن نیز جای استیلن را به‌عنوان یک مادهٔ خام پایه، گرفت. بدین‌ترتیب، بین صنایع بزرگ سنتزی و صنعت نفت، همگرایی فنی دیگری پدید آمد. هیدروکربنهای مایع شده را می‌شد به کارخانه‌های مصرف‌کننده تحویل داد، درحالی‌که واحدهای مصرف‌کنندهٔ اتیلن، لااقل جهت تهیهٔ فراورده‌های بزرگ واسطه‌ای، می‌توانستند در جنب پالایشگاهها برپا شوند. همگرایی فنی با همگرایی تأسیساتی ادامه یافت. همان‌طورکه دیگر نمی‌توان میان صنعت معدن و صنعت شیمی آلی مرز مشخصی برقرار کرد، مرز آشکاری هم بین صنایع شیمی آلی و صنایع نفت وجود ندارد.

این تداخل شاخه‌های بزرگ صنعت شیمی، نه‌تنها بر اثر مبادلهٔ پیوستهٔ مواد خام و فراورده‌های ساختی و تکمیلی متقابل آنها مشخص می‌شود، بلکه همچنین بدلیل مفاهیم اساسی همهٔ عملیات بزرگ تولیدی وجود دارد.

مهندسی شیمی: طرز تفکر نوینی که در عملیات شیمی صنعتی باید بررسی شود با صنعت سنتز نیتروژن و اسید سولفوریک، در دو دههٔ نخستین همین سده، پدید آمد. در چنین موقعیتی،

جدول ۶.ردیف فراورده‌های ساخته شده از استیلن یا اتیلن

لزوم به‌حساب آوردن، در مقیاس صنعتی، تراز ترمودینامیکی واکنشها، تکنیک محاسبهٔ روشهای عملیاتی، دما، فشار، مدت و غیره ـ که تا آن زمان هرگز تحمیل نشده، اما از مدتها پیش پذیرفته شده بودند ـ خدمات گرانقدری در موقعیتهای فراوان دیگر انجام داده‌اند.

دینامیک واکنشها و طرح تجهیزاتی که واکنشها می‌بایست در آنها انجام گیرند، واکنشگاهها که بنوبهٔ خود دستخوش قواعد تازه‌ای شده‌اند: محاسبهٔ شکل، اندازه، ظرفیت و ساخت آنها؛ محاسبهٔ ملزومات آنها از نظر مواد خام، سطوح پشتوانهٔ کاتالیزورها، جریان فراورده‌های تکمیل شده، دستگاههای جابه‌جایی و بالاخره حمل و نقل آنها، به اطلاعات اساسی تبدیل شده‌اند.

باید اطلاعات مربوط به وضع اقتصادی هم به اطلاعات فنی بالا افزوده شوند، که از آن جمله باید از هزینهٔ تهیهٔ مواد خام، سوختها، انرژی، تجهیزات، وسایل انبار کردن به‌طورکلی فراورده‌های تکمیل شده نام برد. این اطلاعات را باید با بررسی بازار، که سوددهی تأسیسات را معین می‌سازد و مقدار مصرف با در نظر گرفتن شرایط جریان کالا، تکمیل کرد.

همهٔ اینها، فی‌نفسه مسایل تازه‌ای نبودند. می‌توان ادعا کرد که آنها سرنوشت همهٔ ساختهای شیمیایی را از اوایل سدهٔ نوزدهم تعیین کرده‌اند ـ دورانی که صنعت بزرگ شیمی با ایجاد دستگاههای بیش از پیش سنگین و بسیار گوناگون و با تولید کالاهای مصرفی برای بازاری که پهنهٔ آن هر روز گسترده‌تر می‌شد، خود را برپا داشته است. این مشکلات طی مدتها بیش از یک سده، در سایهٔ کاردانی و تجربیات حرفه‌ای ما نوفاکتورداران، جملگی به‌طور تجربی حل شدند ـ گرچه حل شماری از آنها، از همان آغاز دوره‌ای که ساخت رنگ‌های مصنوعی درحال تشکیل شاخه‌ای از صنایع سنگین بود درگرو روشهای پیشرفته‌تری از بررسی بود.

بتدریج که تحول فرایندها و ساختها، آهنگ شتابنده‌ای یافت، کم‌کم نیاز به پذیرش روشهای کلی طرح و اجرا احساس شد. این مرحله در طی سالهای ۲۰ و ۳۰ این سده به کمال رسید. مدیران مؤسسات، مهندسان و تکنسین‌ها از صنایع دیگر و بویژه از صنایع ماشین‌سازی ، که مجموعه‌ای از همه‌گونه فعالیتها از مدتها پیش در آنها تمرکز یافته است، سرمشق گرفتند. بدین‌ترتیب، مفهوم مهندسی شیمی در ۱۹۳۱ به توسط آقایان و. ا. بجر[1] و جوزف مک‌کیب[2] در ممالک متحدهٔ امریکا، و در ۱۹۳۴ به توسط ا. اویکن[3] و م. یاکوب[4] در آلمان فرمولبندی شد، گرچه اصطلاحاتی که در زبانهای زنده به‌کار گرفته شدند، جملگی بر مفهوم دقیقاً یکسانی دلالت نمی‌کردند.

هدف این رشته، سیستمی کردن توضیح روشهای کار و به‌کار بردن این سیستم به‌جای کاتالوگ روشها و تجهیزاتی بود که تا آن زمان درکتابهای شیمی صنعتی ضبط می‌شد. این سیستمی کردن

1. W.I.Bedger   2. J.Mac Cabe   3. A.Eucken   4. M.Jacob

جدول ۷. نمونه‌هایی از نشانه‌گذاری در مهندسی شیمی

ساخت / انباشت — در خلأ	تعلیق
تولید با یا حذف گرما — 45°	انحلال
	خرد کردن
تولید با نگاهداری موقتی یک جزء مثلاً با کاتالیز، جذب و غیره	جداسازی پیوسته

با رده‌بندی جدید اطلاعات مورد نظر، عملیات اساسی با مشخصات فیزیکی، عملیات اساسی با مشخصات شیمیایی، مشخص کردن آن واحدهای عملیاتی که اصول آنها در انواع زیادی از کاربردها تغییر نمی‌کنند شکل می‌گیرد. همچنین مهندسی شیمی برای تعمیم روشهای بررسی بمنظور خلق یا اجرای روشهای نظیر تثبیت شرایط عملیات بر پایهٔ محاسبهٔ واکنشها یا قابل فهم کردن تأسیسات خدمت می‌کند. زبان و نشانه‌های تازه‌ای ساخته شده‌اند که وسایل بیان مهندسی شیمی را تشکیل می‌دهند.

در طی سالهای ۵۰ و ۶۰ بود که این رشتهٔ تازه پدید آمد و پایه‌های اساسی آن کامل شد. تغییرات طرز تفکر و کارهایی که در این برهه از زمان اجرا شده‌اند از نظر تاریخ صنعت شیمی، محققاً همان اهمیت را دارند که دانش شیمی در نیمهٔ دوم سدهٔ هجدهم واجد آن بود.

کتاب‌شناسی بخش سوم

دربارهٔ تاریخ معاصر صنعت شیمی، جز کتاب آقای شروود تیلور، کتاب دیگری نوشته نشده است. بررسی این تاریخ، تنها با مقایسهٔ کتابهای عمومی شیمی صنعتی و کتابهای تخصصی دوره‌های مختلف امکان دارد. در فهرست زیر گزیده‌ای از عناوین اصلی، از میان انبوهی از نوشته‌های دیگر آورده شده است. اکثر این عناوین، فقط در کتابخانه‌های عمومی یافت می‌شوند. طبیعی است که باید در زبانهای غیرفرانسوی هم، کتابهایی هم‌ارز آنها نوشته شده باشند. در زبان فرانسه، کتابهای معتبری که زیر نظر آقایان پل پاسکال و ویکتور گرینیار تهیه شده‌اند منابع تاریخی دقیق و نسبتاً کاملی هستند، زیرا دربارهٔ هر موضوع، کتاب‌شناسی ترتیب داده شده برای آن را می‌توان

کامل دانست. کتابهای آلمانی که زیر نظر آقایان ویناکر و کوشلر تهیه شده‌اند نیز با کتاب‌شناسی کاملی مجهز می‌باشند که از نظر تاریخی بسیار مفید هستند؛ گرچه به کمال کتابهای تألیفی آقایان پاسکال و گرینیار دست نیافته‌اند.

Exception faite de l'ouvrage de Sherwood Taylor il n'existe pas d'histoire de l'industrie chimique pour la période contemporaine. Celle-ci ne peut être étudiée que par la comparaison du contenu des traités généraux de chimie industrielle et d'ouvrages spécialisés des différentes époques. On trouvera ci-dessous un choix des principaux titres qui ont été utilisés parmi un très grand nombre d'autres. La majeure partie d'entre eux n'existe plus que dans les bibliothèques.

Naturellement on peut trouver l'équivalent dans les autres langues que le français. En langue française, les grands traités dirigés par Paul Pascal et Victor Grignard constituent des sources historiques exactes et relativement complètes car sur chaque sujet la bibliographie a été effectuée d'une façon que l'on peut considérer comme exhaustive. Mais la consultation en est laborieuse. Le traité allemand dirigé par Winnacker et Küchler comprend également une abondante bibliographie qui peut rendre de grands services au point de vue historique, bien qu'elle ne soit pas aussi complète que celles des deux ouvrages collectifs français de Pascal et de Grignard.

Baud (P.), *Chimie industrielle*, 1922.
Beltzer (Francis J. G.), *La chimie industrielle moderne*, 2 vol., 1909-1911.
Champetier (G.), *Les molécules géantes*, 1948.
Claude (G.), *L'air liquide*, 1909 et 1926.
Delorme (J.), *Toute l'industrie des matières plastiques*, 3 vol., 1937.
— *Le présent et l'avenir des matières plastiques*, 1954.
Fauquet (L. G.), *Histoire de la rayonne et des textiles synthétiques*, 1960.
Grignard (V.), *Traité de chimie organique*, 23 vol., 1935-1954.
Hackspill (L.), *L'azote*, 1922.
Lefèvre (J.), *La liquéfaction des gaz et ses applications*, 1900.
Lunge (G.) et Naville (J.), *Traité de la fabrication de la soude*, 3 vol., trad. franç., 1879-1881.
Mailhe (A.), *Les combustibles liquides artificiels*, 1929.
Marchena (R. E. de), *Les machines frigorifiques à air*, 1901.
— *Les machines frigorifiques à gaz liquéfiables*, 1901.
Minet (Ad.), *Traité théorique et pratique de l'électrochimie*, 1900.
Pascal (P.), *Traité de chimie minérale*, 13 vol., 1931-1934.
Payen (A.), *Précis de chimie industrielle*, 3 vol., 1878.
Randoin (L.) et Simonnet (H.), *Les vitamines*, 1932.
Taylor (S. F.), *A History of Industrial Chemistry*, 1957.
Wagner (R.), Fischer (F.), Gauthier (L.), *Traité de chimie industrielle*, 2 vol., trad. franç., 1901-1903.

به‌کتابشناسی عمومی پایان مجلد پنجم هم مراجعه شود.